



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE CAMPOS

Universidade da Tecnologia e do Trabalho



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL**

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DO REGIME DE VENTOS DO
LITORAL NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO PARA
GERAÇÃO EÓLIO-ELÉTRICA**

AMARO EVALDO DE DEUS

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ

2008

AMARO EVALDO DE DEUS

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DO REGIME DE VENTOS DO
LITORAL NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO PARA
GERAÇÃO EÓLIO-ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Promoção da Sustentabilidade Regional.

Orientador: Professor D.Sc. Marcos Antonio Cruz
Moreira. (Engenharia Elétrica -
Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Co-Orientadora: Professora D.Sc. Rosane
Rodrigues Chaves.
(Meteorologia – Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais)

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ

2008

Dissertação intitulada “Estudos da variabilidade do regime de ventos do litoral norte do Estado do Rio de Janeiro para geração eólico-elétrica”, elaborada por Amaro Evaldo de Deus e apresentada publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, na área de concentração Sustentabilidade Regional e linha de pesquisa Promoção da Sustentabilidade Regional, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos.

Aprovada em 10 de outubro de 2008, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos (CEFET Campos).

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Marcos Antonio Cruz Moreira (Engenharia Elétrica/Universidade Federal do Rio de Janeiro) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos - Orientador

Prof^a D. Sc. Marcelle de Sá Guimarães (Engenharia de Sistemas e Computação/Universidade Federal do Rio de Janeiro) da Universidade Federal Fluminense

Prof^a D. Sc. Rosane Rodrigues Chaves (Meteorologia/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Co-orientadora

DEDICATÓRIA

Dedico a realização desse trabalho a Deus; a minha família, principalmente a Rejane minha esposa, meus filhos: Luciana, Janine, Mariana e João Paulo, a minha neta Larissa e aos meus pais, Herval e Denir por serem todos eles a razão da minha existência, e motivadores da minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por ter permitido que cumprisse com esta etapa de minha caminhada.
- A minha família por ter compreendido as horas de convívio que lhes tirei, mesmo depois de aposentado.
- Ao meu orientador Prof. Marcos Antonio Cruz Moreira, pela sua atenção e amizade demonstrada ao longo desse trabalho.
- A minha co-orientadora Prof^a Rosane Rodrigues Chaves pela sua atenção e por ter me aproximado da climatologia.
- Ao Prof. Hamilton Jorge de Azevedo responsável pelo posto climatológico do Campus Dr. Leonel Miranda da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelos dados fornecidos e pela sua atenção e colaboração.
- A Petrobrás, na pessoa de Sueli do Carmo, chefe do heliporto do Farol de São Thomé, pelos dados cedidos.
- Aos bolsistas Gisele e Rômulo, pela ajuda na digitação de 26.513 linhas de dados em planilha.
- Agradeço a Prof^a Cibele Daher, diretora do CEFET Campos, pelo seu apoio, amizade e atenção.
- Agradeço a todos que colaboraram de maneira direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

EPÍGRAFE

“De tudo ficaram três coisas:
A certeza de que estamos começando,
A certeza de que é preciso continuar e
A certeza de que podemos ser interrompidos antes de terminar
Fazer da interrupção um caminho novo,
Fazer da queda um passo de dança,
Do medo uma escola,
Do sonho uma ponte,
Da procura um encontro,
E assim terá valido a pena existir!”

(Fernando Sabino)

RESUMO

Este trabalho descreve a variabilidade do regime de ventos no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro. Foram utilizados registros da velocidade do vento e de sua direção através de duas estações meteorológicas: A estação da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com anemômetro a 2 metros de altura com 31 anos de registros, de 1975 a 2005, e a estação do Heliporto da Petrobrás em Farol de São Thomé, operada pelo Infraero com 6 anos de registros de dados diários, de 2002 a 2007 com anemômetro a 10 metros de altura. Os dados observados nas estações locais foram comparados com os dados da re-análise do "National Centers for Environmental Prediction" (NCEP) e do "National Center Atmospheric Research" (NCAR). A importância de um estudo para determinação da variabilidade dos ventos para fins de geração eólico-elétrica é relevante pelo fato dessa fonte de energia primária ter regime variável, diferentemente de outras fontes convencionais como a água ou termo gás, e ser determinante na energia total gerada ao longo de um determinado período. Esse estudo da variabilidade do vento é feito através de uma análise estatística de uma série histórica de dados de vento da Baixada Campista com o objetivo de obter um conjunto de informações sobre o regime médio da velocidade e direção dos ventos ao longo do dia e dos meses do ano, além de prever a probabilidade da ocorrência de velocidade utilizando a distribuição de Weibull. Baseado no regime apresentado poderá ser previsto a energia total produzida por determinados aerogeradores com diferentes alturas e aplicações. Este trabalho forneceu informações sobre o potencial eólico da região, que pode servir de suporte para a implantação de empreendimentos eólicos de pequeno porte para eletrificação rural em comunidades isoladas, ou de grande porte para parques eólicos de produção e comercialização de energia elétrica. Na região da Baixada Campista foi encontrada uma densidade de potência eólica (DPV) média de 207 W/m^2 na altura de 10m e 513 W/m^2 na altura de 50m, sendo de nordeste (NE) a direção predominante do vento com 38 % de frequência. A velocidade média do vento encontrada na altura de 10m foi de 5,73 m/s e na altura de 50m de 7,73 m/s. O regime de ventos encontrado apresentou um fator de forma (K) de Weibull de 2,11 para o período 2002-2007. O trimestre OND apresentou melhor regularidade no regime de ventos com $K = 2,27$.

Palavras-chave: Potencial eólico, distribuição de Weibull, aerogeradores, direção do vento.

ABSTRACT

This work describes the variability of the regime of winds in the north coast of the State of Rio de Janeiro. Registrations of the speed of the wind and of its direction were used through two meteorological stations: the station of the Rural Federal University of Rio de Janeiro, with anemometer at 2 meters of height with 31 years of registrations, and the station of the Heliport of Petrobrás in Farol de São Thomé, operated by Infraero with 6 years of registrations of daily data, from 2002 to 2007 with anemometer at 10 meters of height. The data observed in the local stations were compared to the data of the reanalysis of the National Centers for Environmental Prediction " (NCEP) and of the " National Center Atmospheric Research " (NCAR). The importance of a study for determination of the variability of the winds for ends of aeolian-electric generation, is relevant for the fact of that primary source of energy have variable regime, differently from the other conventional sources as the water or term gas, and to be decisive in the total energy generated along a certain period. That study of the variability of the wind is made through a statistical analysis of a historical series of data of wind of the Baixada Campista with the objective of obtaining a group of information about the medium regime of the speed and direction of the winds along the day and of the months of the year, besides predicting the probability of the occurrence of speed using the distribution of Weibull. Based on the presented regime the total energy can be foreseen produced by certain aero generators with different heights and applications. This work supplied information on the aeolic potential of the area, making possible the implantation of small aeolian enterprises for rural electrification in isolated communities, or big ones for aeolian parks production and electric power commercialization. In Baixada Campista's area it was found a density of potency eólica (DPV) average of 207 W/m^2 in the height of 10m and 513 W/m^2 in the height of 50m, being of northeast (NE) the predominant direction of the wind with 38% of frequency. The medium speed of the wind found in the height of 10m was of 5,73 m/s and in the height of 50m of 7,73 m/s. The found regime of winds presented a form factor (K) of Weibull 2,11 for the period 2002-2007. The quarter OND presented better regularity in the regime of winds with $K = 2,27$.

Key-word: Aeolic potential, distribution of Weibull, aero generators, direction of the wind.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1

Localização da área de estudo 22

FIGURA 2

Distribuição geral dos ventos sobre a América do Sul..... 24

FIGURA 3

Distribuição geográfica do potencial eólico do Brasil 31

GRÁFICO 1

Previsão da potência eólica instalada no mundo até 2020 30

GRÁFICO 2

Médias mensais da velocidade do vento na estação 1 de 1975-2005 na altura de 2 m... 47

GRÁFICO 3

Velocidade média mensal do vento nas estações 1 e 2 de 1975 – 2005 na altura de 10 m... 48

GRÁFICO 4

Variação da velocidade média mensal do vento período 2002-2007 na estação 2 49

GRÁFICO 5

Variação da Velocidade média trimestral do vento no período 2002-2007 na estação 2 50

GRÁFICO 6

Variação da velocidade média horária do vento no período 2002-2007 na estação 2 51

GRÁFICO 7

Distribuição de Weibull na estação 2 na altura de 10m no período 2002-2007 52

GRÁFICO 8

Distribuição de Weibull na estação 2 na altura de 50m no período 2002-2007..... 53

GRÁFICO 9

Velocidade média do vento da medição da estação 1 e da re-análise do NCEP para as mesmas coordenadas no período 1975 - 2005..... 55

GRÁFICO 10

Velocidade média do vento da medição da estação 2, e da re-análise do NCEP, na altura de 10 m, para as mesmas coordenadas, no período 2002 - 2007..... 56

GRÁFICO 11

Velocidade média do vento para os dados da medição e da reanálise na estação 2 na altura de 10 m no ano de 2002..... 57

GRÁFICO 12

Velocidade média do vento dos dados da re-análise do NCEP nas coordenadas das estações 1 e 2 no período 1948 – 2008 58

GRÁFICO 13

Velocidade média do vento dos dados das medições nas estações 1 e 2 nos períodos de 1975 a 2005 e 2002 a 2007, respectivamente 59

GRÁFICO 14

Varição do fator de forma de Weibull mensal na estação 2 no período 2002-2007 61

GRÁFICO 15

Curva de potência do aerogerador ENERCON E-33 62

GRÁFICO 16

Histograma da distribuição normal da velocidade do vento na altura de 50m 64

GRÁFICO 17

Curva de potência do aerogerador GRW 246..... 66

GRÁFICO 18

Curva de produção mensal de energia do aerogerador GRW 246 66

GRÁFICO 19

Histograma da distribuição normal da velocidade do vento na altura de 10m 67

GRÁFICO 20

Rosa dos ventos para o período 2002-2007 na altura de 10m..... 69

GRÁFICO 21

Rosa dos ventos para o período 2002-2007 na altura de 50m..... 70

GRÁFICO 22.a

Rosa dos ventos do trimestre JFM de 2002-2007 na estação 2 na altura de 10m 72

GRÁFICO 22.b

Rosa dos ventos do trimestre AMJ de 2002-2007 na estação 2 na altura de 10m 72

GRÁFICO 22.c

Rosa dos ventos do trimestre JAS de 2002-2007 na estação 2 na altura de 10m 73

GRÁFICO 22.d

Rosa dos ventos do trimestre OND de 2002-2007 na estação 2 na altura de 10m 73

GRÁFICO 23.1

Rosa dos ventos de janeiro 76

GRÁFICO 23.2

Rosa dos ventos de fevereiro 76

GRÁFICO 23.3

Rosa dos ventos de março 76

GRÁFICO 23.4

Rosa dos ventos de abril 76

GRÁFICO 23.5	
Rosa dos ventos de maio	76
GRÁFICO 23.6	
Rosa dos ventos de junho	76
GRÁFICO 23.7	
Rosa dos ventos de julho	76
GRÁFICO 23.8	
Rosa dos ventos de agosto	76
GRÁFICO 23.9	
Rosa dos ventos de setembro	76
GRÁFICO 23.10	
Rosa dos ventos de outubro	76
GRÁFICO 23.11	
Rosa dos ventos de novembro	76
GRÁFICO 23.12	
Rosa dos ventos de dezembro	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1

Fator de rugosidade para diferentes tipos de vegetação 27

TABELA 2

Classes de rugosidade adotadas pelo Atlas Europeu 28

TABELA 3

Os 10 maiores em capacidade instalada de energia eólica no mundo em 2006..... 29

TABELA 4

Empreendimentos de geração elétrica outorgados até 2008 no Brasil 32

TABELA 5

Empreendimentos de geração elétrica em operação no Brasil em 2008 33

TABELA 6

Empreendimentos de geração elétrica em construção no Brasil em 2008..... 33

TABELA 7

Médias mensais da velocidade do vento na estação 1 de 1975 a 2005..... 46

TABELA 8

Velocidade média mensal do vento no período 2002-2007 na estação 2na altura de 10m 49

TABELA 9

Velocidade média do vento por períodos do dia na estação 2 51

TABELA 10

Síntese da estatística da velocidade e direção dos ventos na estação 2 no período 2002-2007 nas alturas de 10m e 50m. 54

TABELA 11

Análise estatística sobre as médias mensais da velocidade do vento na estação 2..... 60

TABELA 12	
Dados técnicos do aerogerador ENERCON E-33 de 330 kW	62
TABELA 13	
Distribuição de frequência da velocidade do vento na estação 2 na altura de 50 m ..	63
TABELA 14	
Dados técnicos do aerogerador GERAR246 da ENERSUD	65
TABELA 15	
Distribuição de frequência da velocidade do vento na estação 2 na altura de 10 m .	67
TABELA 16	
Distribuição de frequência da direção do vento no período 2002 – 2007 na altura de 10 m na estação 2.	69
TABELA 17	
Distribuição de frequência da direção do vento no período 2002 - 2007 na altura de 50 m na estação 2.....	70
TABELA 18.a	
Rosa dos ventos do trimestre JFM	72
TABELA 18.b	
Rosa dos ventos do trimestre AMJ.....	72
TABELA 18.c	
Rosa dos ventos do trimestre JAS	73
TABELA 18.d	
Rosa dos ventos do trimestre OND	73
TABELA 19	
Distribuição de frequência da direção do vento na estação 2 de janeiro a dezembro do período 2002 -2007.....	77

TABELA 20

Velocidade média mensal do vento no período 2002-2007 na altura de 10m na estação 2 por
setor da rosa dos ventos..... 78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET Campos - Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos
METAR – Relatório Meteorológico de Aeródromo
NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
CDC – Climate Diagnostic Center
NCEP - National Centers for Environmental Prediction
NCAR – National Center for Atmospheric Research
GRADS - Graphic Analysis and Display System
DP – Desvio Padrão
JFM – Janeiro-Fevereiro-Março
AMJ - Abril-Maio-Junho
JAS – Julho-Agosto-Setembro
OND – Outubro-Novembro-Dezembro
DPV – Densidade de Potência do Vento
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
CEPEL – Centro de Pesquisa em Energia Elétrica
MESOMAP - Wind Mapping System (Sistema de Mapeamento do Vento em média Escala)
IDER – Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis
CERCPH – Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidroelétricas
DP – Desvio Padrão
K – Fator de Forma de Weibull
C – Fator de Escala de Weibull
CGH – Central de Geração Hidroelétrica
EOL – Usina Eólica
PCH – Pequena Central Hidroelétrica
UHE – Usina Hidroelétrica
UTE – Usina Termoelétrica
UTN – Usina Termonuclear
SOL – Geração Solar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Avaliação do potencial eólico de uma região	23
2.1.1	Distribuição geral dos ventos.....	24
2.2	Densidade de potência do vento.....	25
2.3	Fatores que influenciam no regime dos ventos.....	25
2.3.1	Variação da velocidade do vento com a altura	26
2.3.2	Influência da rugosidade do terreno na variação da velocidade	28
2.4	Panorama da energia eólica no mundo.....	29
2.4.1	Previsão da potência eólica mundial até o ano 2020.....	29
2.5	Panorama da energia eólica no Brasil.....	31
2.5.1	Capacidade de geração elétrica no Brasil.....	32
2.6	Fonte dos dados.....	34
2.6.1	Fonte de dados a partir de modelos numéricos.....	34
2.6.1.1	Dados do NCEP/NCAR.....	34
2.6.2	Fonte de dados a partir de observações locais.....	34
2.6.2.1	Avaliação dos efeitos da camada limite superficial – CLS	35
2.6.2.2	Influência dos obstáculos.....	35
2.6.2.3	Influência do relevo (variação na altura do terreno)	36
2.6.3	Avaliação usando metodologia estatística.....	36
2.6.3.1	Distribuição de Weibull.....	37

2. 6. 3. 2	Expressão de Weibull.....	38
2. 6. 3. 3	Determinação dos parâmetros k e c de Weibull de forma empírica.....	38
2. 6. 3. 4	Teste de ajuste da distribuição de Weibull.....	39
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	A origem dos dados.....	41
3.1.1	Descrição da origem dos dados.....	41
3.1.1.1	Das medições das estações meteorológicas locais.	41
3.1.1.2	Dados provenientes da re-análise do CDC/NOAA-NCEP/NCAR	43
3.1.2	Teste de correlação	44
3. 1. 3	Análise da potência eólica fornecida pelo rotor.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	Análise dos dados das estações 1 e 2.....	46
4.1.1	Análise dos dados observados na estação 1.....	46
4.1.1.1	Teste de correlação da velocidade média observada nas estações 1 e 2.....	48
4.1.2	Análise dos dados observados na estação 2.....	48
4.1.2.1	Velocidade média.....	48
4.1.2.2	Velocidade média mensal.....	49
4.1.2.3	Velocidade média trimestral.....	50
4.1.2.4	Velocidade média horária.....	50
4.1.2.5	Distribuição de Weibull da velocidade do vento na estação 2	51
4.1.2.6	Distribuição de Weibull para a velocidade do vento	

no período 2002-2007 na altura de 10 m.....	52
4.1.2.7 Distribuição de Weibull para a velocidade do vento no período 2002-2007 na altura de 50 m.....	52
4.1.2.8 Síntese dos resultados obtidos da análise estatística da estação 2.....	53
4.1.3 Análise dos dados do NCEP/NCAR para as estações 1 e 2	54
4.1.4 Avaliação do potencial eólico da região da estação 2.....	60
4.1.5 Estudo de caso com aerogeradores típicos de grande e pequeno porte	61
4.1.5.1 Aerogeradores de grande porte.....	61
4.1.5.2 Aerogeradores de pequeno porte.....	64
4.1.6 Síntese da estatística da direção predominante do vento na estação 2	68
4.1.6.1 A rosa dos ventos da estação 2.....	68
4.1.6.2 Rosa dos ventos da estação 2 na altura de 10m.....	68
4.1.6.3 Rosa dos ventos da estação 2 na altura de 50m.....	69
4.1.6.4 Rosa dos ventos trimestral da estação 2 no período 2002-2007.....	71
4.1.7 Síntese dos resultados da direção do vento nos períodos trimestrais, na estação 2.....	74
4.1.8 Rosa dos ventos dos períodos mensais de 2002-2007 na estação 2.	76
4.1.9 Média mensal da velocidade do vento no período 2002-2007 na estação 2 na altura de 10m, por setor da rosa dos ventos.....	78
5 CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Aquecimento global, mudanças climáticas severas, efeito estufa, emissão de gases poluentes, elevação do nível dos mares, são questões preocupantes. Desenvolvimento sustentável, equilíbrio ambiental, energias alternativas renováveis, eco-economia, uso racional e equilibrado do espaço e do tempo, são alternativas que poderão reverter este quadro, promovendo a conservação e o equilíbrio ambiental.

Energia é o insumo básico para o desenvolvimento mundial, e tem provocado alterações na matriz energética na maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, com conseqüências que podem provocar em alguns casos o desequilíbrio ambiental. O mundo busca a qualquer custo o seu desenvolvimento e conseqüentemente tem aumentado de certa forma o uso de combustíveis fósseis em suas matrizes energéticas, não buscando as energias alternativas e renováveis. Por outro lado, países como o Brasil tem buscado mudanças na sua Matriz, que até bem pouco tempo atrás tinha grande concentração na fonte hídrica devido à sua generosa disponibilidade de água, hoje está buscando um uso mais equilibrado e sustentável de seus recursos energéticos, e aproveitando sua privilegiada localização geográfica, como país de clima tropical pode dispor de grandes quantidades de energia de fonte solar e eólica. Ações envolvendo a sociedade, governo, instituições de pesquisa e universidades têm sido realizadas no Brasil. Fazendo com que sua matriz energética seja motivo de debates, estudos e mudanças, o que se pode notar pelo número de teses e dissertações cujo foco se relaciona com o tema energia eólica, quer seja na agricultura ou na geração de eletricidade.

Nos EUA, em Cleveland surgiu a primeira unidade eólica para geração de eletricidade em 1988. A Alemanha (primeiro lugar no mundo em utilização de eletricidade de fonte eólica) teve suas primeiras usinas no início do século 20. Em 2006 a Alemanha se coloca em primeiro lugar na geração eólica com 20.622 MW de potência instalada. Na Dinamarca a energia eólio-elétrica não é considerada energia alternativa, pois é a principal fonte de energia utilizada, com 3.136 MW de potência instalada (dados de 2006), de fonte eólica. No Brasil a primeira usina eólica foi construída em 1998 com 5 MW, embora com pequeno avanço saísse de 5 MW em 1998 para 248 MW em 2008, o que representa apenas 0,24% do total de sua Matriz Elétrica, enquanto que na Dinamarca 18% da energia elétrica consumida é de origem eólica. O Brasil está atualmente com 109 empreendimentos de geração eólio-elétrica com outorga concedida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o que representa uma potência total de 4.691 MW (20,54 % do total de Outorgas para geração de Energia

Elétrica), se todas estas 109 Usinas outorgadas entrassem em operação hoje, o Brasil ficaria em 4º lugar no mundo, a frente de Dinamarca e Índia. Em Piracicaba – SP está localizada uma das maiores empresas fabricantes de equipamentos para turbinas eólicas do mundo, exporta quase toda a produção para a Europa, EUA e Ásia. Existe um mapeamento eólico que cobre todo o território Brasileiro (ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL) elaborado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito (CRESESB), este Atlas foi elaborado através do MESOMAP, software de modelagem numérica para ventos de superfície e disponível para qualquer estudo preliminar de aproveitamento eólico no Brasil. As conclusões do Atlas apontam para um potencial de 143 GW de potência.

Diversos estudos mais específicos têm sido elaborados através principalmente das estatais do setor elétrico dos estados do Sul e Nordeste, visando ampliar o mapeamento eólico e detectar locais com condições mais adequadas a empreendimentos eólio-elétricos.

No Estado do Rio de Janeiro (Cabo Frio, São João da Barra e São Francisco do Itabapoana) já existem alguns empreendimentos outorgados. A região do litoral Norte Fluminense, onde este estudo tem seu foco, se apresenta bastante promissora do ponto de vista de viabilidade técnico-econômica para sediar empreendimentos dessa natureza.

Dentre outras razões para se realizar um estudo sobre intensidade e direção dos ventos em uma região pode-se citar:

- A direção do vento é bastante variável no tempo e no espaço, em função da situação geográfica do local, da rugosidade da superfície, do relevo, da vegetação e da época do ano (VENDRAMINI, 1986, apud MUNHOZ, F. C. ; GARCIA, A., 2004).
- Segundo (MARTINS 1993, apud MUNHOZ, F. C. ; GARCIA, A., 2004), o conhecimento da direção predominante dos ventos e velocidades médias que ocorrem num local fornece informações importantes para o posicionamento de quebra ventos, orientações na construção de estábulos, distribuição das diferentes culturas no campo e principalmente, no posicionamento e dimensionamento das torres para a utilização desta fonte de energia natural.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho se caracteriza por estudar e identificar a variabilidade da velocidade e direção dos ventos na faixa litorânea do Norte do Estado do Rio de Janeiro, viabilizando futuros empreendimentos eólicos de pequeno porte para instalações de consumo rural e de grande porte para produção e comercialização de energia elétrica.

A área de estudo deste trabalho localiza-se na bacia do baixo Paraíba, que se estende por uma faixa litorânea de aproximadamente 20 km de largura de longitude 40° 00' a 40° 10' W por 100 km de comprimento, entre as latitudes 21° 15' e 22° 15', uma área de aproximadamente 2000 km². Nessa área encontra-se uma planície de restinga, constituída de vegetação rasteira, com predominância de pecuária, produção de cana-de-açúcar e atividade na indústria de cerâmica.

Na Figura (1) pode-se observar a localização das duas estações meteorológicas utilizadas, nota-se que a estação denominada heliporto (estação 2), de propriedade da Petrobrás está localizada no litoral, região de ventos mais favoráveis, e a estação denominada UFFRJ (estação 1) está localizada no perímetro urbano da Cidade de Campos dos Goytacazes.

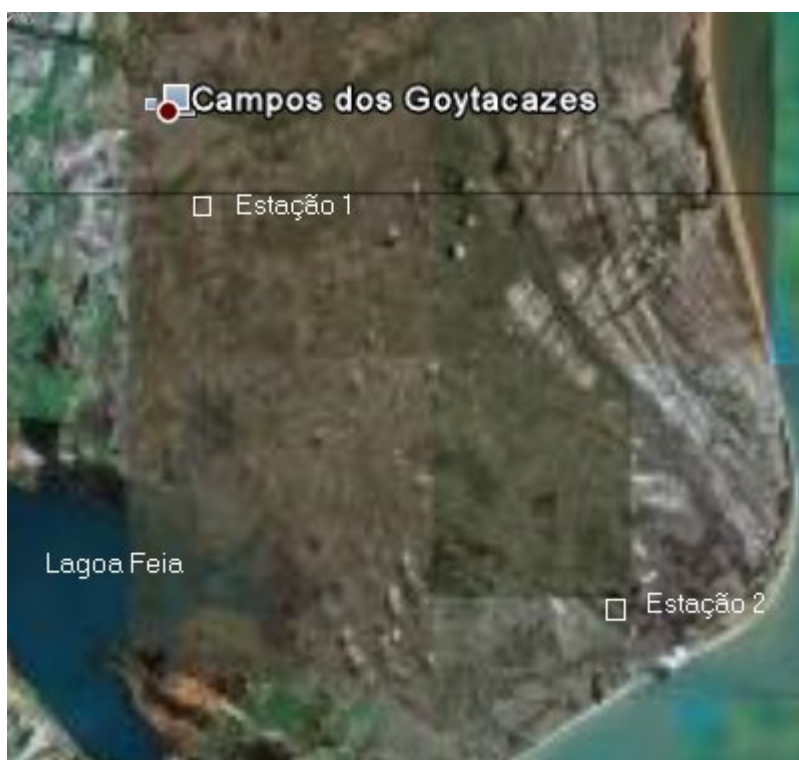


Figura 1: Localização da área de estudo
Imagem modificada de Google Earth

2 REVISÃO DE LITERATURA

2. 1. Avaliação do Potencial Eólico de uma Região

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m. Essa proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 32% na Europa Ocidental.

Mesmo assim, estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano. Devido, porém, a restrições socioambientais, apenas 53.000 TWh (cerca de 10%) são considerados tecnicamente aproveitáveis. Ainda assim, esse potencial líquido corresponde a cerca de quatro vezes o consumo mundial de eletricidade.

No Brasil, os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha (PE), no início dos anos 90. Embora os aproveitamentos eólicos sejam recentes, já se conta com diversas plantas do território nacional. Hoje, estima-se que o potencial eólico no Brasil seja superior a 60.000 MW. Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB), o potencial chega a 143 GW, como pode ser observado no livro "Atlas do Potencial Eólico Brasileiro".

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB).

2. 1. 1 Distribuição geral dos ventos

A distribuição geral dos ventos sobre o Brasil é controlada pelos aspectos da circulação geral planetária da atmosfera próxima, conforme se apresenta na Figura (2). Dentre esses aspectos, sobressaem os sistemas de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da Depressão Equatorial.

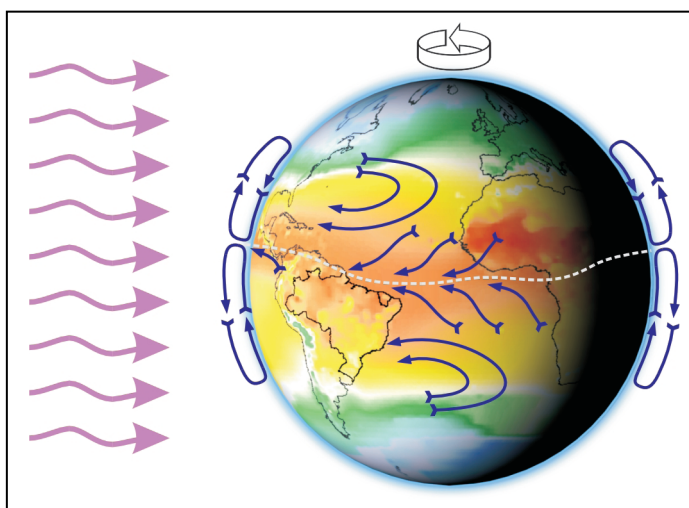


Figura 2: Distribuição geral dos ventos sobre a América do Sul.
Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - CRESESB/CEPEL.

A Zona Litorânea Nordeste-Sudeste é definida como a faixa de aproximadamente 100 km de largura que se estende entre o Cabo de São Roque (RN) até aproximadamente o Estado do Rio de Janeiro. As velocidades médias anuais decrescem de 8-9 m/s na porção norte (Rio Grande do Norte) até 3,5m/s a 6m/s sobre a maioria da costa que se estende até o Sudeste.

A exceção mais significativa desse comportamento está na costa entre as latitudes 21° S e 23° S (sul do Espírito Santo e nordeste do Rio de Janeiro), onde as velocidades são próximas de 7,5m/s. Isso é resultante do efeito de bloqueio do escoamento leste-nordeste (causado pelo Anticiclone Subtropical Atlântico) pelas montanhas imediatamente a oeste da costa. Nesse caso, é criada uma espécie de aceleração por obstáculo, pois o ar acelera-se para o sul para aliviar o acúmulo de massa causado pelo bloqueio das formações montanhosas. Ao sul dessa região, a costa do Estado do Rio de Janeiro desvia-se para oeste, onde os ventos passam a ser consideravelmente mais fracos devido ao abrigo das montanhas a norte e a nordeste. Disso resultam velocidades relativamente menores na região que engloba a cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro
Disponível em: www.cresesb.cepel.br/
Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB)

2. 2 Densidade da Potência do Vento (DPV)

A energia elétrica gerada por um aerogerador depende da energia proveniente do vento que passa através da área varrida pela pá do rotor da turbina eólica por unidade de tempo. Este fluxo de energia é chamado de densidade de potência de vento (DPV).

$$DPV = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (1)$$

Na qual

ρ é a densidade do ar.

V é a velocidade do vento.

A potência do vento que passa perpendicularmente através de uma área circular é dada por:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \pi R^2 \quad (2)$$

Na qual

P = potência média do vento em Watts [W].

ρ (rho) = densidade do ar seco = 1,191 kg/m³.

V = velocidade média do vento [m/s].

π (pi) = 3.1415926535...

R = raio do rotor em m [metros].

Segundo (SOUZA, 2001, apud OLIVEIRA, C. E. L. et al., 2003), a potência eólica acima de 15 W/m² torna viável o uso da energia eólica na agricultura.

2. 3 Fatores que influenciam no regime de ventos

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

As informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos. O uso de imagens aéreas e dados de satélite também contribui para uma análise mais acurada.

2.3.1 Variação da velocidade do vento com a altura

O deslocamento do ar sobre a superfície da terra, como estudado na mecânica dos fluidos, forma uma camada limite que se estendem a grandes alturas onde, em geral, o escoamento em seu interior é feito de modo turbulento. Uma vez que a altura das turbinas eólicas não ultrapassa a camada limite e, portanto, estão sujeitas a turbulências, é importante conhecer o perfil da velocidade do vento ao longo de uma seção transversal, ou seja, o perfil da velocidade em relação à altura.

O estabelecimento da camada limite terrestre é complexo e sofre a influência de fatores, incluindo aqueles de origem térmica, que podem causar instabilidade na atmosfera.

Para utilização em problemas relacionados com o aproveitamento da energia eólica em suas diversas aplicações, costuma-se apresentar a distribuição de velocidade com a altura utilizando-se os modelos da “Lei da Potência” e a “Lei Logarítmica”. A “Lei da Potência” é um modelo simples para se determinar a velocidade do vento a uma determinada altura desejada em função da velocidade medida a uma dada altura e um fator de rugosidade do local n . (DUTRA, R. M., 2001 pg. 169).

A “lei da Potência” é expressa por:

$$V(z) = V(z_r) (Z/Z_r)^n \quad (3)$$

Na qual

$V(z_r)$ = Velocidade na Altura de referência Z_r

$V(z)$ = Velocidade na altura desejada

Z_r = Altura de Referência

Z = Altura desejada

n = Fator n (parâmetro associado à rugosidade da superfície)

Tabela 1: Fator de rugosidade (fator n) para diferentes tipos de vegetação.

Descrição do terreno	(Fator n)
Superfície lisa, lago, oceano	0,1
Gramma baixa	0,14
Vegetação rasteira (até 0,3 m) árvores ocasionais	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,20
Árvores, construções ocasionais	0,22-0,24
Áreas residenciais	0,28-0,40

Fonte: (HIRATA, 1985, apud DUTRA, 2001)

A "Lei Logarítmica" é um modelo mais complexo onde é considerado o fato de que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento. A modelagem do Perfil Logarítmico utiliza o conceito de comprimento de mistura L ("mixing length") definido com a utilização da constante de Von Kármán kc e o comprimento de rugosidade Z_0 , que considera que a superfície da Terra nunca se apresenta perfeitamente lisa.

O modelo do Perfil Logarítmico é frequentemente utilizado para estimar a velocidade do vento em uma altura a partir de uma altura de referência. Pode-se determinar a velocidade de vento em uma determinada altura a partir de duas expressões de perfil logarítmico: uma para a altura de referência (Z_r) e outra para a altura desejada (Z). Essa equação torna-se mais precisa ao considerar a rugosidade em cada expressão logarítmica das alturas Z e Z_c . (DUTRA, 2001)

A "Lei Logarítmica" pode ser expressa pela equação:

$$V(z) = V(z_r) \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_r/Z_0)} \quad (4)$$

Na qual

$V(z_r)$ = Velocidade na altura de referência z_r

$V(z)$ = Velocidade na altura z

Z_r = Altura de referência

Z = Altura desejada

Z_0 = Comprimento de rugosidade do local.

2. 3. 2 Influência da rugosidade do terreno na variação da velocidade

A rugosidade de um terreno é o conjunto de elementos, formado por árvores, arbustos, vegetação rasteira e pequenas construções sobre a superfície do solo, que oferecem resistência à passagem do vento e desviam a sua rota além de causar pequenas turbulências na superfície. A rugosidade de uma área qualquer é determinada pela altura e distribuição dos seus elementos. Quanto mais densa e mais alta for a sua formação, maior será a rugosidade e, portanto, maior será a dificuldade que o vento terá para se deslocar. Em geral, nas considerações sobre o valor da variável n da "Lei de Potência" (Eq.(3)) e o valor do comprimento de rugosidade Z_0 da "Lei Logarítmica" (Eq.(4)), conclui-se que ambas estão diretamente associadas à rugosidade do terreno. (DUTRA, 2001). Na Tabela 2 têm-se os valores de rugosidade de superfície adotados pelo Atlas Eólico Europeu, classificados por 4 classes de rugosidade, onde Z_0 representa o comprimento da rugosidade.

Tabela 2: As classes de rugosidade adotadas pelo Atlas Europeu

Z_0	Característica da Superfície	Classe de Rugosidade
1	Cidades, Florestas	3
0,5	Periferia	
0,3	Área abrigada	
0,2	Várias árvores/arbustos	2
0,1	Planície muito cultivada	
0,05	Planície pouco cultivada	1
0,03	Planície com algumas construções, árvores, etc.	
0,01	Áreas de pista de aeroporto com construções e árvores	
0,005	Solo exposto	
0,001	Superfície de gelo	0
0,0003	Superfície de areia	
0,0001	Superfície de água, (lagoas, mar etc.)	

Fonte: (MORTENSEN, 1993 E TROEN, 1989, apud DUTRA, 2001 pag. 173).

2. 4 Panorama da Energia Eólica no Mundo

2. 4. 1 Previsão da Potência Eólica Mundial até o ano 2020.

A Tabela (3) mostra a capacidade instalada total nos principais países produtores de energia eólica no mundo ao final do ano de 2006 e o incremento de energia eólica adicional no mesmo ano. Países como China (47%), França (51%) e Portugal (38%) tiveram um grande incremento na capacidade instalada de energia eólica em seus sistemas no ano de 2006.

Tabela 3: Os 10 maiores em capacidade instalada de energia eólica no mundo em 2006.

País	Capacidade adicional em 2006 [MW]	Capacidade instalada total [MW]
Alemanha	2194	20622
Espanha	1587	11615
EUA	2454	11603
Índia	1840	6270
Dinamarca	8	3136
China	1145	2405
Itália	405	2123
Reino Unido	610	1963
Portugal	628	1650
França	810	1567

Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEE)
Disponível em: www.senado.gov.br/web/comissoes/cma/ap/

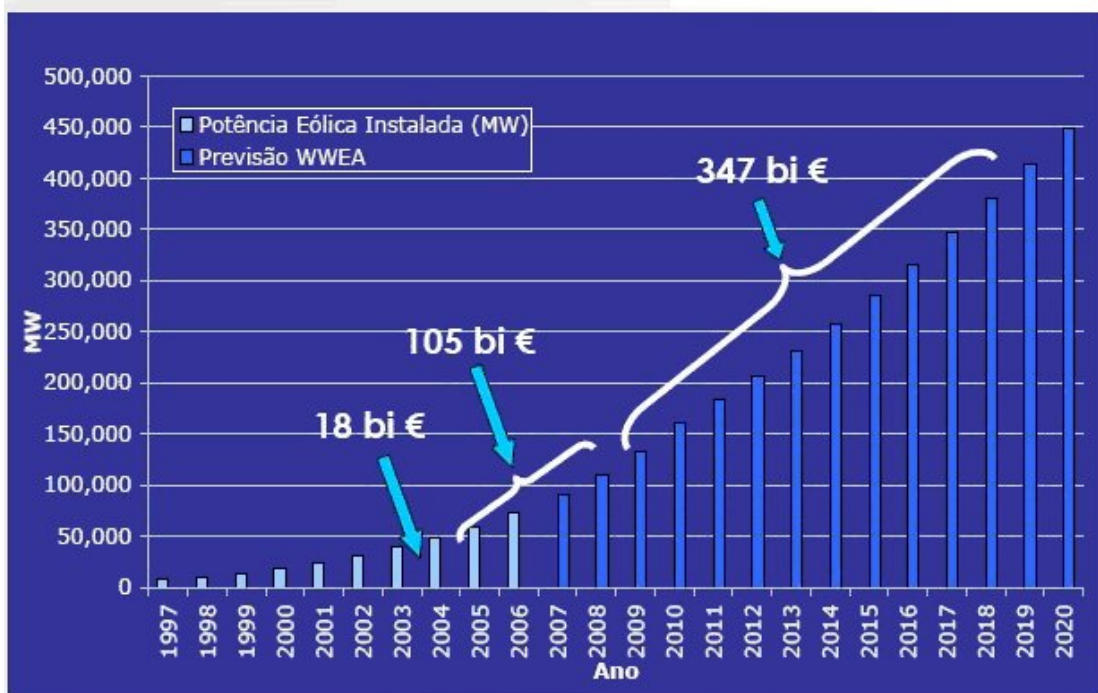


Gráfico 1: Previsão da potência eólica instalada no Mundo até 2020.
 Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEE)
 Disponível em: www.senado.gov.br/web/comissoes/cma/ap/

2. 5 Panorama da Energia Eólica no Brasil

A Figura (3) mostra a distribuição geográfica do potencial eólico do Brasil – Centro de Referência em Energia Eólica Sergio Brito no CIER – Seminário Internacional de Energia Renovável.

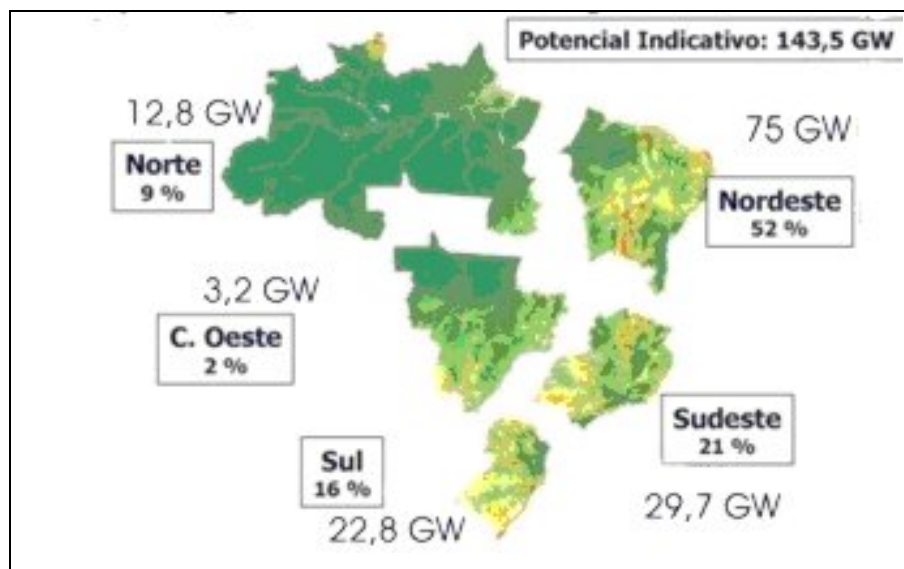


Figura 3: Distribuição geográfica do potencial eólico do Brasil.

Fonte: IDER – Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis

Disponível em: <http://www.ider.org.br/oktiva.net/1365/nota/17360/>

Acesso em: maio 2007

A região Nordeste do Brasil é a que apresenta maior potencial eólico com 75 GW, o que representa 52% de todo o potencial disponível no Brasil. A região Sudeste também apresenta bom potencial eólico com 29,7 GW. O valor estimado do Potencial Eólico Brasileiro está atualmente em 143 GW, segundo dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Fonte: CRESESB/CEPEL. Disponível em: www.cresesb.cepel.br.

2.5.1 Capacidade de Geração Elétrica do Brasil

Tabela 4: Empreendimentos de geração elétrica outorgado até 2008 no Brasil.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	75	51.189	0,22
EOL	82	3.981.313	17,22
PCH	153	2.295.976	9,93
UHE	15	6.114.900	26,45
UTE	153	10.677.209	46,18
Total	478	23.120.587	100

Fonte: Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)
Banco de Informações Gerais.
Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/15.htm>
Acesso em: 27 de junho de 2008

O Brasil possui no total 1.712 empreendimentos em operação, gerando 101.173.956 kW de potência Tabela (5).

Está previsto para os próximos anos uma adição de 30.979.329 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 145 empreendimentos atualmente em construção Tabela (6) e mais 478 empreendimentos outorgados Tabela (4).

Desses empreendimentos outorgados podemos notar um grande percentual para a geração eólica com 3.981 MW, o que representa 17,22 % do total da potência outorgada, mas que ainda não iniciaram a sua construção.

Tabela 5: Empreendimentos de geração elétrica em operação no Brasil em 2008.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	220	115.931	115.302	0,11
EOL	16	248.250	247.050	0,24
PCH	301	2.067.948	2.039.667	2,02
SOL	1	20	20	0
UHE	159	74.572.295	75.066.931	74,20
UTE	1.013	24.417.043	21.697.986	21,45
UTN	2	2.007.000	2.007.000	1,98
Total	1.712	103.428.487	101.173.956	100

Fonte: Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - Banco de Informações Gerais

Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/15.htm>

Acesso em: 27 de junho de 2008

Na Tabela 5 podemos notar que o setor de geração eólica apresenta um índice muito baixo de unidades em operação no Brasil, com apenas 248 MW de potência, o que representa 0,24 % da potência de geração elétrica total em operação.

Tabela 6: Empreendimentos de geração elétrica em construção no Brasil em 2008.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	1	848	0,01
EOL	16	149.430	1,90
PCH	83	1.375.730	17,51
UHE	21	4.317.500	54,94
UTE	24	2.015.234	25,64
Total	145	7.858.742	100

Fonte: Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - Banco de Informações Gerais

Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/15.htm>

Acesso em 27 de junho de 2008

Como mostra a Tabela 6, deveremos ter nos próximos anos um incremento de 149 MW de potência eólica, com a conclusão dos empreendimentos atualmente em construção.

2. 6 FONTE DOS DADOS

A fonte dos dados é extremamente importante em qualquer estudo científico. O tratamento das informações contidas nas variáveis ambientais requer uma avaliação também para as fontes dos dados.

2. 6. 1 Fontes de Dados a partir de Modelos Numéricos

2. 6. 1. 1 Dados do NCEP/NCAR

Vários estudos têm sido realizados com variáveis meteorológicas utilizando-se de dados provenientes do NCEP/NCAR.

A partir de 1995, o projeto "re-análise", do National Center for Atmospheric Research/National Center for Environmental Prediction - NCAR/NCEP, proporcionou a geração de uma base de informações de variáveis meteorológicas em pontos de grade. Aplicou-se, neste processamento, o estado atual da arte em análise e previsão dentro de um rígido controle de qualidade (KALNAY et al., 1996, apud CAVALCANTE, E. P., et al., 2005).

2. 6. 2 Fontes de Dados a partir de observações Locais

Um estudo para levantamento do regime eólico de uma região pode ser feito através da análise dos dados das observações locais utilizando-se de medições anemométricas instaladas em locais adequados, ou utilizando-se da extensa rede de estações meteorológicas existente no Brasil.

O estudo para o Regime Eólico de Quatro Estações do Nordeste, (CHOU, S. C. et al., 2006) adotou esta metodologia. Neste estudo foi realizada uma análise preliminar dos ventos medidos pelas torres eólicas a partir de parâmetros de Distribuição de Weibull. O período medido foi de junho de 2004 a setembro de 2005. As torres eólicas de medição foram instaladas nas cidades de Belo Jardim, Petrolina, São João do Cariri e Triunfo.

Constatou-se no estudo apresentado a viabilidade do aproveitamento eólico ou não da região estudada pela análise estatística e probabilística da distribuição das frequências da velocidade média no período de 1 ano, bem como da direção predominante dos ventos e dos fatores de forma “K” e de escala “C” da distribuição de Weibull. Regime Eólico de Quatro Estações do Nordeste, (CHOU, S. C. et al., 2006).

2. 6. 2. 1 Avaliação dos efeitos da Camada Limite Superficial - CLS

O deslocamento das massas de ar na camada limite superficial sofre grandes influências dos elementos que compõe a superfície do planeta, a cobertura vegetal, os obstáculos e a orografia.

Camada limite superficial (CLS) - onde predominam as forças inerciais sobre as viscosas, com espessura da ordem de dezenas de metros, onde existem gradientes verticais intensos das variáveis atmosféricas: temperatura, umidade e momento.

Fonte: (Wikipédia) http://pt.wikipedia.org/wiki/Camada_limite_planetária

2. 6. 2. 2 Influência dos obstáculos

Os obstáculos são elementos de dimensões conhecidas que podem causar redução na velocidade do vento e produzem o chamado *efeito de sombreamento*. Os obstáculos não apenas obstruem o movimento das partículas de ar, como também modificam a distribuição de velocidades. Elementos, como pedras e rochas com grande volume, morros, construções civis, torres não porosas e agrupamento denso de árvores de grande altura, podem ser considerados obstáculos caso sua distância em relação ao ponto de observação seja pequena.

O perfil do escoamento é influenciado por vários fatores como a forma dos obstáculos, a distância entre eles, sua porosidade, entre outros. A influência quantitativa dos obstáculos apresenta perdas significativas sob o ponto de vista energético devido, por exemplo, a mudanças de direção dos ventos ou a turbulências. O estudo quantitativo da influencia dos obstáculos requer modelagens complexas nas quais, em geral, os obstáculos são considerados como “caixas” com seção transversal retangular. Sob esse aspecto, deve-se considerar também sua posição relativa em relação ao ponto de interesse, suas dimensões e sua porosidade.

Dado um acidente geográfico deve-se estar apto a associá-lo a um obstáculo ou a um conjunto que irá compor a rugosidade do terreno. Em distâncias próximas ao obstáculo, o perfil de velocidade é bastante perturbado, especialmente a jusante, onde existe o desenvolvimento da esteira viscosa. Nessas condições, o obstáculo deverá ser tratado individualmente e não como parte de um conjunto que compõe a rugosidade do terreno (SILVA, 1999). A influência dos obstáculos está diretamente ligada às suas dimensões, principalmente sua altura. A área influenciada pela presença de um obstáculo – efeito *Sheltering Effect* -pode estender-se

por até três vezes a sua altura, no sentido vertical, e até quarenta vezes essa mesma altura, no sentido horizontal, na direção do vento.
Fonte: (DUTRA, 2001, p. 173, 174).

2. 6. 2. 3 Influência do Relevo (variação na altura do terreno)

Assim como a rugosidade e os obstáculos, o relevo tem influência marcante no regime de ventos. De fato, na presença de uma colina pode-se verificar, dependendo da sua geometria, um aumento na velocidade do vento e uma considerável mudança de direção. Além disso, o perfil de velocidade é fortemente afetado pela colina. Outros acidentes geográficos, tais como vales, depressões e “gargantas” também influenciam no regime dos ventos. Muitas vezes, para descrever o relevo de uma região, utilizam-se curvas de nível, extraídas dos mapas topográficos. A análise do escoamento em um terreno utilizando curvas de nível não é de fácil modelagem. Vários programas computacionais, destinados à análise de sítios eólicos, utilizam curvas de nível complexas, com grande detalhamento. Com o avanço dos modelos de escoamento e a crescente velocidade de processamento dos computadores, os resultados mostram-se cada vez mais acessíveis e confiáveis, uma vez que, atualmente, não se necessita de supercomputadores para se obter dados com nível de precisão aceitável para análises do comportamento da velocidade do vento em um determinado terreno.

Fonte: (DUTRA, 2001, p. 174, 175).

2. 6. 3 Avaliação Usando Metodologia Estatística

A avaliação dos dados de velocidade média do vento utilizando-se de metodologia estatística é a que mais se encontra nos estudos de avaliação de potencial eólico.

A avaliação da velocidade média e direção predominante do vento, utilizando método probabilístico busca verificar as ocorrências de variabilidade sazonal, mensal, diária e até mesmo horária nos valores médios estimados dentro de uma série de anos (LEITE, M.L., et al., 2006).

Segundo (SOUSA, 1993, apud OLIVEIRA C.E.L et al., 2003), a velocidade média do vento acima de 3 m/s e a potência eólica maior do que 15 w/m^2 torna-se viável para o uso da energia eólica na agricultura, para fins de bombeamento de água para irrigação.

(PARK et al., 1979, apud LEITE, 2006) consideraram que a velocidade média anual do vento varia de um ano para outro em torno de 10%, observando porém que em alguns locais foram verificados variações de até 30%.

(VAREJÃO-SILVA, 2001) salienta que a velocidade do vento à superfície terrestre varia bastante com o tempo e se caracteriza por intensas oscilações cuja rapidez e amplitudes estão relacionadas com o estado de agitação do ar, que constitui a turbulência.

Dados de velocidades máximas diárias de vento provenientes de 20 anos de observações (1975 a 1994) na localidade de Piracicaba – SP foram utilizadas para testar as distribuições de probabilidade Normal, Gama, Weibull e de valores extremos para cada mês do ano. Os autores concluíram ser possível recomendar qualquer uma das três distribuições citadas para estimativa da probabilidade de ocorrência de rajadas de vento na localidade em qualquer mês do ano (ANGELOCCI et al., apud LEITE, 2006).

No Trabalho Avaliação da Velocidade Média e Direção Predominante do Vento em Ponta Grossa – PR, (LEITE, M.L., et al., 2006) foi estudado a velocidade média do vento por meio das distribuições de probabilidade de Weibull, Rayleigh e Beta. O Estudo foi baseado em uma série histórica de 26 anos de registros diários de velocidade média do vento em 10 e 13 metros de altura.

Também foram observados os parâmetros mensais das distribuições de Weibull, (k e c), Hayleigh (μ), e Beta (p e q).

2. 6. 3. 1 Distribuição de Weibull

Uma vez que a intensidade dos ventos não é constante, para se determinar a energia produzida pelos ventos durante certo intervalo de tempo é necessário realizar um tratamento nos dados que os representam, de forma a estratificar as velocidades e as frequências em que eles ocorreram (histograma de velocidade), (DUTRA, 2001).

A maioria dos estudos relacionados à potência do vento se concentra no problema dos ajustes de distribuições estatísticas aos dados de velocidade do vento (JUSTUS et al., 1976; VAN der AUWERA et al., 1980; REHMAN et al., 1994; GARCIA et al., 1998; NFAQUI et al., 1998; SILVA et al., 2002; ARCHER & JACOBSON, 2003, apud SANSIGOLO, C. A. 2007). Os resultados destes estudos também indicam a distribuição de Weibull como a que melhor se ajusta a estes dados (SASIGOLO, C. A., 2007).

Em estudos de energia eólica as Distribuições mais empregadas são as de Weibull e de Rayleigh (ROHATGI e NELSON, 1994, LOPES, 2000, BURTON et al. 2002, apud KUHNNEN et al., 2004).

A distribuição de Weibull é o método mais utilizado para se realizar o tratamento estatístico de histogramas relativos ao comportamento dos ventos, além, também, de ser amplamente utilizado pela maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia. ((SILVA, 1999) (ARAÚJO, 1989) (ROHATGI, 1994)(TROEN, 1989) (FERREIRA, 2000), apud DUTRA, 2001).

2. 6. 3. 2 Expressão de Weibull

2. 6. 3. 3 Determinação dos parâmetros k e c de Weibull de forma empírica

O parâmetro de forma k e o parâmetro de escala c podem ser determinados através do seguinte desenvolvimento:

A energia capturada pelo aerogerador em um intervalo de tempo T pode ser dada pela equação abaixo, conforme (Burton et al. (2002), apud Kuhnen et al., (2004)).

$$E = T \int_{V_0}^V P(V) f(V) dV \quad (5)$$

Na qual

V_0 - A velocidade para a qual o aerogerador começa a produzir energia elétrica.

V - velocidade máxima do aerogerador

P(V) - Potência em função da velocidade do vento, dado pela curva de potência do aerogerador fornecida pelo fabricante.

f(V) - Densidade de distribuição da velocidade do vento.

A função densidade de probabilidade de Weibull das velocidades do vento V é obtida da seguinte equação: (Kuhnen et al., (2004)).

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad (6)$$

Onde:

V - velocidade do vento

k - fator de forma de Weibull

c - fator de escala de Weibull

A velocidade média do vento V para a expressão de Weibull como função de k e c é calculada pela equação:

$$\bar{V} = c.\Gamma(1 + 1/k) \quad (7)$$

Desenvolvimento para se encontrar os valores de k e c

Dividindo-se o cubo da velocidade média pela média dos cubos das velocidades chega-se ao seguinte desenvolvimento:

$$\bar{V}^3 = (c.\Gamma(1 + 1/k))^3 \quad (8)$$

$$\bar{V}^3 = c^3.\Gamma(1 + 3/k) \quad (9)$$

$$\bar{V}^3 / \bar{V}^3 = (c.\Gamma(1 + 1/k))^3 / c^3.\Gamma(1 + 3/k) = (\Gamma(1 + 1/k))^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (10)$$

A equação (7) permite determinar o fator de forma (k), através dos dados empíricos.

Uma vez conhecido o valor de k , determina-se o fator de escala (c) na equação (4) (Kuhnen et al., (2004).

O fator de forma (K) de Weibull está relacionado com a variância da velocidade média, representa a regularidade dos ventos, os valores da velocidade concentram-se em uma faixa mais ou menos estreita. O fator de escala (C) de Weibull está relacionado com o valor da velocidade média.

O fator de escala (C) de Weibull representa o valor de velocidade de vento abaixo do qual encontramos 63,2 % dos dados (<http://www.qualytek.com.br> (2006), apud DALMAZ A., et al., 2006).

Os valores mais comumente encontrados de k estão entre 1,5 e 3, e quanto maior o valor de k , mais regular será o vento, (DALMAZ, A., et al., 2006).

2. 6. 3. 4 Teste de ajuste da distribuição de Weibull

Nos estudos que se utilizam de metodologias estatísticas para cálculos de distribuição de probabilidade torna-se essencial os testes de ajustes para identificação do melhor modelo de distribuição a ser utilizado, isto é o que melhor se ajusta aos dados. Para a escolha do modelo estatístico correto, embora a distribuição de Weibull tenha sido comprovadamente a mais utilizada nos estudos eólicos, pode-se aplicar alguns testes, como os de aderência e de tendência.

No estudo Avaliação da Velocidade Média e Direção Predominante do Vento em Ponta Grossa – PR, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para determinar o modelo probabilístico que melhor se ajustou aos dados observados (LEITE, M.L., et al., 2006). Foram utilizadas neste estudo as distribuições de Weibull, Rayleigh e Beta.

No trabalho de Análise Climatológica do Potencial Eólico na Região de Cascavel – PR foi realizado o teste de normalidade de SHAPIRO-WILK, em 5 % de significância para comparar as médias anuais de potência eólica (OLIVEIRA, C. E. L, et al., 2003).

Neste mesmo trabalho também foi aplicado teste não paramétrico de COX-STUART (CAMPOS, 1979) para verificar a tendência das médias anuais de potência eólica disponível, com nível de significância de 5 %. (OLIVEIRA, C. E. L, et al., 2003).

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta nesta investigação é a de análises estatísticas das velocidades média, máxima, diária, mensal, anual e sazonal, bem como da direção predominante dos ventos, frequência (número de horas) da velocidade média por direção, mensal, trimestral e anual, bem como seus desvios padrão, determinação do fator de forma e fator de escala das distribuições de frequência dos dados das medições anemométricas, determinação da densidade de potência disponível, e da energia produzida com a utilização de turbinas e aerogeradores de pequeno porte visando a instalação para consumo residencial e rural e de grande porte para instalações de parques eólicos, para isso serão considerados para efeito de estudo os aerogeradores de pequeno porte de 1 a 7 kW da ENERSUD e o aerogerador de grande porte da ENERCON E-33 de 330kW.

Para a análise estatística dos dados e construção dos gráficos foi utilizado o software Minitab15, na sua versão Acadêmica de distribuição livre (DEMO), para 30 dias de uso.

A avaliação da velocidade média e direção predominante do vento, utilizando método probabilístico busca verificar as ocorrências de variabilidade sazonal, mensal, diária e até mesmo horária nos valores médios estimados dentro de uma série de anos (LEITE, M.L., et al., 2006).

3.1 A Origem dos Dados

Para a elaboração desse estudo utilizou-se as séries históricas de dados de medições anemométricas provenientes de estações meteorológicas locais, e dados provenientes da Re-análise do CDC/NOAA - NCEP.

3. 1. 1 Descrição da origem dos dados.

3. 1. 1. 1 Das medições das estações meteorológicas locais.

Estação 1:

Posto Climatológico do Campus Dr. Leonel Miranda da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Responsável técnico: D. Sc. Hamilton Jorge de Azevedo

Localização: Campos dos Goytacazes, Donana, Estrada Campos - Farol de São Thomé km 5 sem número.

Latitude: 21,8030 S (UTM 7.565.261,5)

Longitude: 41,2959 W (UTM 262.838,5)

Instrumentação Utilizada:

O anemômetro instalado nesta estação é do tipo totalizador com sensores de concha instalado a uma altura de 2 metros, modelo IH ANM-4 marca HIDROLOGIA S.A.

A estação encontra-se no perímetro urbano da cidade, com raio em seu entorno de 50 m livre de obstáculo. Foi considerado um fator $Z_0 = 0,5$ (classe 3) da tabela de rugosidade (MORTENSEN, 1993 E TROEN, 1989, apud DUTRA, 2001 pag. 173), para extrapolação da velocidade para alturas superiores através da “lei logarítmica”. As extrapolações foram feitas para a alturas de 10 metros para comparação com os dados da estação 2, cujo anemômetro encontra-se na altura de 10m.

A série histórica compreende o período de 01/01/1975 a 31/12/2005, com medições de velocidade média diária em km/h.

Estação 2

Estação Meteorológica de propriedade da Petrobrás e controlada pelo Infraero para controle do tráfego aéreo do Heliporto de Farol de São Thomé.

Localização: Farol de São Thomé, região litorânea de Campos dos Goytacazes.

Latitude: 22.0288 S.

Longitude: 41.0682 W.

Instrumentação Utilizada:

Anemômetro

Fabricante: Vaisala

Modelo: AH6960-034

A estação meteorológica do Heliporto do Farol de São Thomé é operada pelo Infraero para controle do tráfego aéreo do Heliporto de propriedade da Petrobrás.

Os dados da medição (velocidade e direção do vento) são coletados com intervalos de 1 h no período diurno de 9 às 21hs UTC. O anemômetro é do tipo concha em torre de 10 metros de altura com leitura digital (monitor) . A direção do vento é obtida com divisão de escala de 10 graus.

Nos dias com até dois dados ausentes, tanto na estação 1 quanto na estação 2, foi considerado o valor de n-1 e/ou n-2.

Para os períodos com até 7 dias de dados ausentes foi considerado a climatologia do período anterior do mês em curso.

Os dados da medição foram filtrados manualmente retirando da mensagem do METAR somente os valores de hora, dia, mês e ano, velocidade em kt e direção.

Os dados foram digitados em planilha eletrônica para as devidas análises estatísticas.

A velocidade observada na altura de 10 metros na estação 2 foi extrapolada para 50 metros, utilizando o modelo da “Lei Logarítmica”.

“O modelo do Perfil Logarítmico é freqüentemente utilizado para estimar a velocidade do vento em uma altura a partir de uma altura de referência. Pode-se determinar a velocidade de vento em uma determinada altura a partir de duas expressões de perfil logarítmico: uma para a altura de referência (Z_r) e outra para a altura desejada (Z). Essa equação torna-se mais precisa ao considerar a rugosidade em cada expressão logarítmica das alturas Z e Z_c .” (DUTRA, 2001)

A extrapolação da velocidade poderá ser feita também para outras alturas, dependendo do diâmetro do rotor da turbina a ser utilizada. Neste estudo a velocidade na altura de 10 metros da medição aproxima-se da altura das torres utilizadas pelos aerogeradores de pequeno porte na faixa de 3 a 7 kW (usual para as instalações de consumo residencial/rural). Já a especificação de 50 metros é em função da altura do eixo do rotor do aerogerador E-33 de 330 kW da ENERCON (usualmente utilizado em usinas eólicas de grande porte).

Para os dados ausentes nas séries observadas das estações que por algum motivo não foram coletadas. No caso de um ou dois dados consecutivos ausentes, considerou-se a substituição pelos dados n-1 e n-2. No caso de um número maior do que dois dados consecutivos ausentes consideraram-se a climatologia do período mais próximo. Na série de dados da estação 1, considerou-se como ausente o ano de 1990 por não ter sido coletado.

3. 1. 1. 2 Dados provenientes da re-análise do CDC/NOAA – NCEP

A Re-análise do CDC/NOAA/NCEP (Administração Nacional de Pesquisas Atmosféricas e Oceânicas dos Estados Unidos da America), National Centers for Environmental Prediction" (NCEP) e do "National Center Atmospheric Research" (NCAR). são dados re-analisados e tratados por modelos matemáticos, dando-lhe maior grau de confiabilidade. Estão disponíveis um grande número e tipo de dados atmosféricos e oceânicos que podem ser utilizados livremente. Neste estudo utilizaram os dados de velocidade do vento (variável wspd), no nível da superfície coletados no site do CDC/NOAA, no endereço:

<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.surface.html>.

Arquivo : wspd.mon.mean.nc (média mensal de 1948 até 2008), variável WSPD no nível da superfície. (Kalnay et al.,1996).The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996.

Os dados do arquivo: (wspd.mon.mean.nc), se refere a médias mensais de velocidade do vento no período de 1948 até o presente, no formato binário que posteriormente são analisados e visualizados no "GRADS" que é um Software de análise e visualização de dados em ponto de grade.

A curva dos dados da re-análise referentes à variável velocidade do vento, em nível da superfície (wspd), será comparada à curva dos dados observados nas estações 1 e 2 nas alturas de 10 metros.

Um programa em FORTRAN 90 foi desenvolvido para binarizar os dados das estações 1 e 2 e gerar o arquivo no formato binário (formato do GRADS), compatibilizando e uniformizando os formatos dos dados para que possa dessa forma ser lidos e visualizados no GRADS.

3. 1. 2 Teste de correlação.

O teste de correlação normalmente se aplica quando se deseja medir a existência de correlação entre duas ou mais variáveis, ou seja o grau de associação, por exemplo entre x e y. De acordo com o valor do coeficiente de correlação (r) encontrado pode-se afirmar se há ou não associação ou correlação entre as referidas variáveis. Para um valor de r acima de 0,70 considerou-se a existência de forte correlação.

Na metodologia aplicada neste trabalho utilizar-se-á o teste de correlação entre as velocidades médias mensais encontradas nas estações 1 e 2 em um mesmo período, neste caso consideraram-se o ano de 2002, onde foram usadas duas amostras de tamanhos iguais.

Levou-se em conta para efetuar este teste, a proximidade das duas estações, logo ambas estão sob as mesmas influências do clima local, onde se pode afirmar que se têm duas variáveis dependentes de uma terceira. Portanto, se puder comprovar a existência de correlação entre estas duas amostras, poder-se-á extrapolar no tempo as velocidades médias para as duas estações. Dessa forma poder-se-á testar e validar os dados da estação 2 situada na região foco do estudo.

3. 1. 3 Análise da potência eólica fornecida pelo rotor

Para a análise da potência eólica fornecida pelo rotor , foram consideradas as turbinas de exemplo utilizadas nesse trabalho, ou seja, a turbina GERAR240 da ENERSUD de 1000 watts de potência e a turbina E-33 de 330 kWatts da ENERCON. Tabela (12) e Tabela (14).

A potência eólica fornecida pelo rotor foi calculada pela eq. (11)

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \quad (11)$$

Na qual:

S - área do rotor varrida pelas pás do rotor

ρ é a densidade do ar (= 1,191 kg/m³)

V é a velocidade média do vento.

A densidade do ar foi calculada considerando como temperatura média do ar na região o valor de 23°C e a altitude do anemômetro de 10m.

C_p - coeficiente de potência, cujo valor máximo é o limite de Betz ($C_p = 0,593$), (Burton et. al., 2002 apud, Khunen, et. al., 2004).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise dos dados das estações 1 e 2

4.1.1 Análise dos dados observados na estação 1

As medições da estação 1 estão representadas na Tabela (7). A velocidade média anual na altura de 2 m, a velocidade média extrapolada para a altura de 10 m e o desvio padrão da velocidade média. A série de dados desta estação foi medida em km/dia, com uma medição diária que representa a velocidade média do vento ao longo daquele dia, e posteriormente transformada para m/s.

Na Tabela (7), são apresentadas as médias mensais das velocidades medidas na estação 1 no período de 1975 a 2005.

Tabela 7: Médias mensais da velocidade do vento na estação 1 de 1975 a 2005.

Mês	Velocidade média (m/s) na altura do anemômetro (2 m)	Velocidade média (m/s) extrapolados para 10 m de altura	Desvio padrão da velocidade média (m/s) – 2m
Janeiro	2,23	4,82	0,46
Fevereiro	2,18	4,71	0,43
Março	1,76	3,80	0,38
Abril	1,53	3,31	0,29
Mai	1,37	2,96	0,24
Junho	1,35	2,92	0,25
Julho	1,64	3,54	0,32
Agosto	2,05	4,42	0,37
Setembro	2,46	5,33	0,41
Outubro	2,48	5,36	0,41
Novembro	2,44	5,28	0,50
Dezembro	2,34	5,06	0,50
Média	1,99	4,30	-

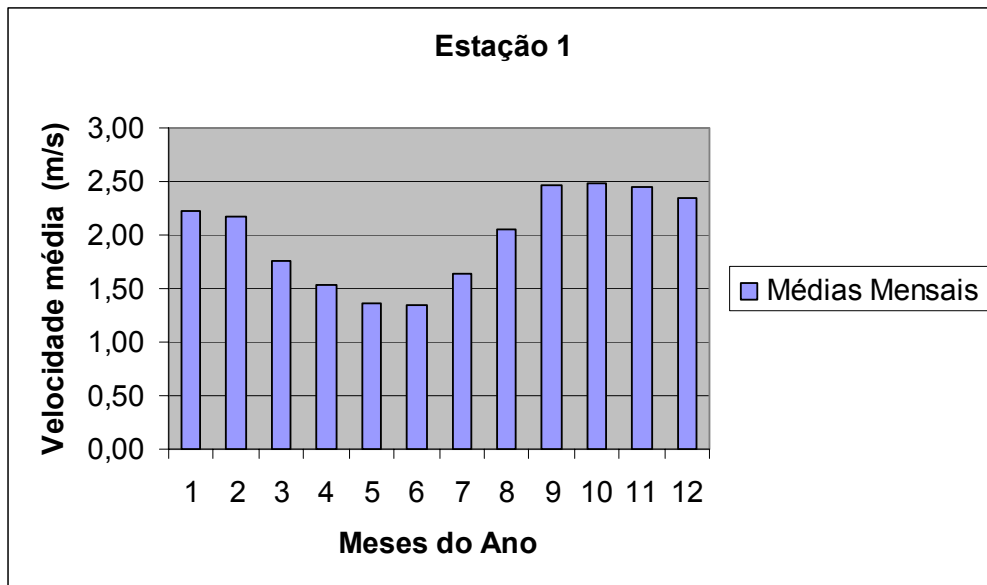


Gráfico 2: Médias mensais da velocidade do vento na estação 1 no período 1975-2005 na altura de 2 m.

A velocidade média do vento foi extrapolada para a altura de 10 m considerando o comprimento da rugosidade de 0,5 (periferia) para a classe de rugosidade 3, conforme Tabela (2) das classes de rugosidades adotadas pelo Atlas Europeu (MORTENSEN, 1993 E TROEN, 1989, apud DUTRA, 2001 pag. 173).

No Gráfico (3) é apresentado uma comparação das velocidades médias mensais para a altura de 10 m das estações 1 e 2. A média mensal da estação 2 corresponde ao período de 2002 a 2007, e a média mensal da estação 1 ao período de 1975 a 2005.

As velocidades da estação 1 foram extrapoladas para 10m de altura pela “Lei Logarítmica”.

As velocidades médias encontradas na região da estação 1, na altura de 10m derivadas da altura de 2 m, ficaram inferiores as velocidades médias encontradas na altura de 10 m na estação 2.

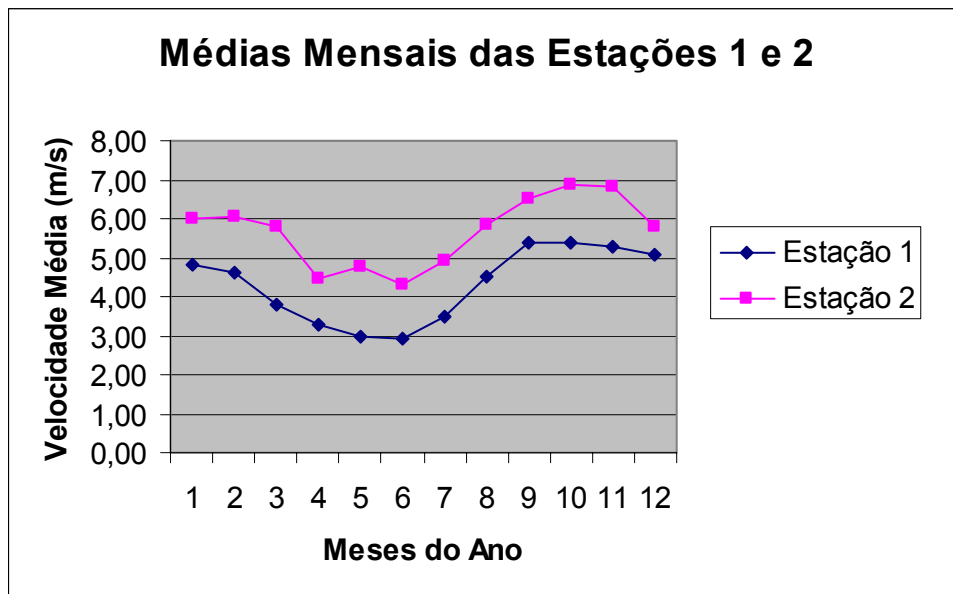


Gráfico 3: Velocidade média mensal do vento nas estações 1 e 2 na altura de 10m.

4. 1. 1. 1 Teste de Correlação da velocidade média observada nas estações 1 e 2.

Foi aplicado o teste de correlação, através de regressão linear entre as variáveis velocidade do vento na estação 1 na altura de 10 m (X) e a velocidade do vento na estação 2 na altura também de 10m (Y) apresentando como resultado um fator de correlação $r = 0,91$, para $n = 12$ valores, representando as velocidades médias mensais nas duas estações, o que significa forte correlação entre as duas variáveis, ou seja, a velocidade média mensal do ano de 2002 na estação 1 está fortemente correlacionada com a velocidade média mensal do mesmo ano na estação 2.

Portanto, pode-se dizer que há fortes possibilidades da variabilidade dos ventos na estação 1 serem semelhantes às verificadas na estação 2.

4. 1. 2 Análise dos dados observados na estação 2.

4. 1. 2. 1 Velocidade média

Será feita uma análise dos dados das velocidades do vento no período observado de 01 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2007. Destes dados serão extraídas as velocidades médias mensais, trimestrais e horárias.

4. 1. 2. 2 Velocidade média mensal

No Gráfico (4) é apresentada a variação da velocidade média mensal dos ventos no período de 01 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2007 na estação 2, na altura de 10m.

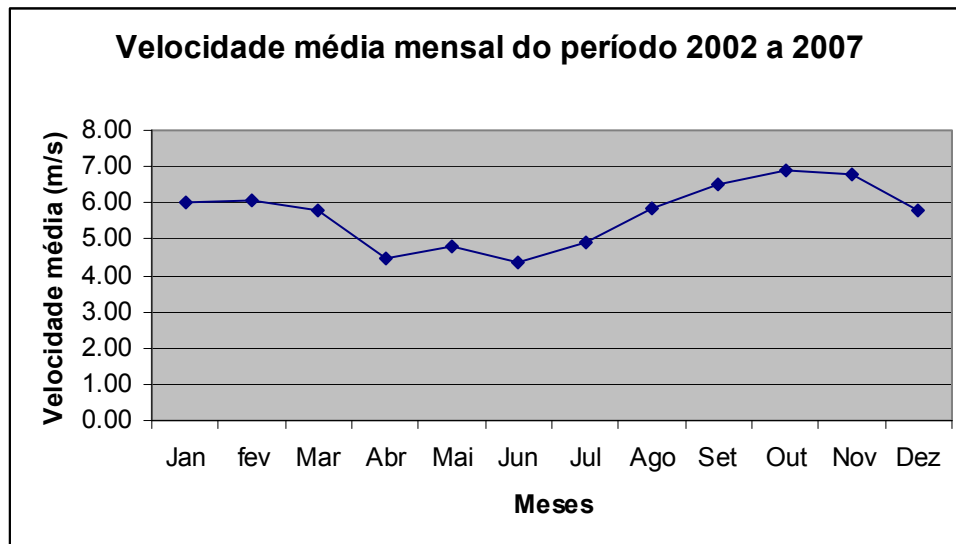


Gráfico 4: Variação da velocidade média mensal do vento período 2002-2007 na estação 2.

Na Tabela (9) são apresentadas as velocidades médias mensais do vento no período 2002-2007 na estação 2.

Tabela 8: Velocidade média mensal do vento no período 2002-2007 da estação 2 na altura de 10m.

Meses	Velocidade (m/s)
Janeiro	6.02
Fevereiro	6.07
Março	5.81
Abril	4.45
Mai	4.79
Junho	4.33
Julho	4.94
Agosto	5.86
Setembro	6.53
Outubro	6.88
Novembro	6.81
Dezembro	5.81

Observando o Gráfico (4) e a Tabela (8) nota-se que a velocidade média nos meses da primavera e verão se situaram na faixa entre 6 a 7 m/s, ao longo do período analisado.

4. 1. 2. 3 Velocidade média trimestral

No Gráfico (5) é apresentada a variação da velocidade média trimestral no período 2002-2007 na estação 2, na altura de 10m.

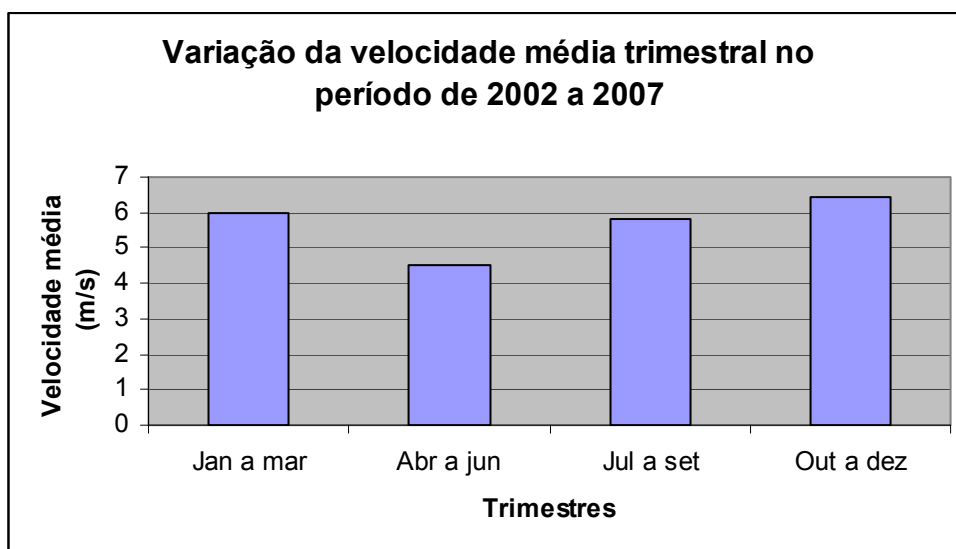


Gráfico 5: Variação da velocidade média trimestral do vento no período 2002-2007 na estação 2, na altura de 10m.

4. 1. 2. 4 Velocidade média horária

No cálculo da média horária considerou-se o período diurno de 6 horas às 18 horas, que corresponde à coleta de dados realizada na estação de 2. Estes dados são coletados com intervalos de uma hora e notou-se na série de dados alguns horários ausentes, em raras ocasiões. Nesses casos, para 1 ou 2 dados ausentes considerou-se o dado anterior (n-1 ou n-2).

No Gráfico (6) é apresentada a variação da velocidade média horária dos ventos no período de 01 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2007.

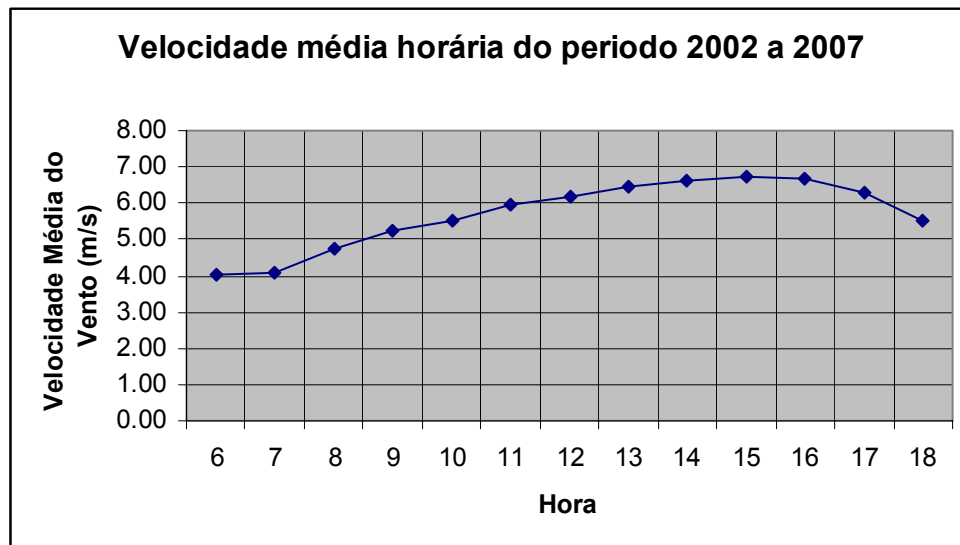


Gráfico 6: Variação da velocidade média horária do vento no período 2002-2007 na estação 2.

Pode-se notar no Gráfico 6 que a velocidade média dos ventos na estação 2 tem uma elevação gradativa a partir das 7 horas atingindo um valor máximo próximo a 7 m/s, por volta de 15h. e 16h. Considerando o período diurno agrupado por faixa de horário encontramos os seguintes valores de velocidade média mostrada na Tabela (9):

Tabela 9: Velocidade média do vento por períodos do dia na estação 2.

Período (hora)	6h – 9h	10h – 12h	13h – 15h	16h – 18h
V. média (m/s)	4,52	5,91	6,61	6,26

4. 1. 2. 5 Distribuição de Weibull da velocidade do vento na estação 2

Os gráficos apresentados foram elaborados pelo software MiniTab© versão 15.1.1.1, (versão de demonstração por 30 dias). A série de dados de velocidade do vento considerada é constituída por 25513 valores de medições no período diurno, de 6h às 18 h, do dia 01 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2007, e para os trimestres janeiro-março, abril-junho, julho-setembro e outubro-dezembro.

4. 1. 2. 6 Distribuição de Weibull para a velocidade do vento no período 2002-2007 na altura de 10 m.

O Gráfico (7) mostra a curva da função de Weibull para altura de 10 m na estação 2.

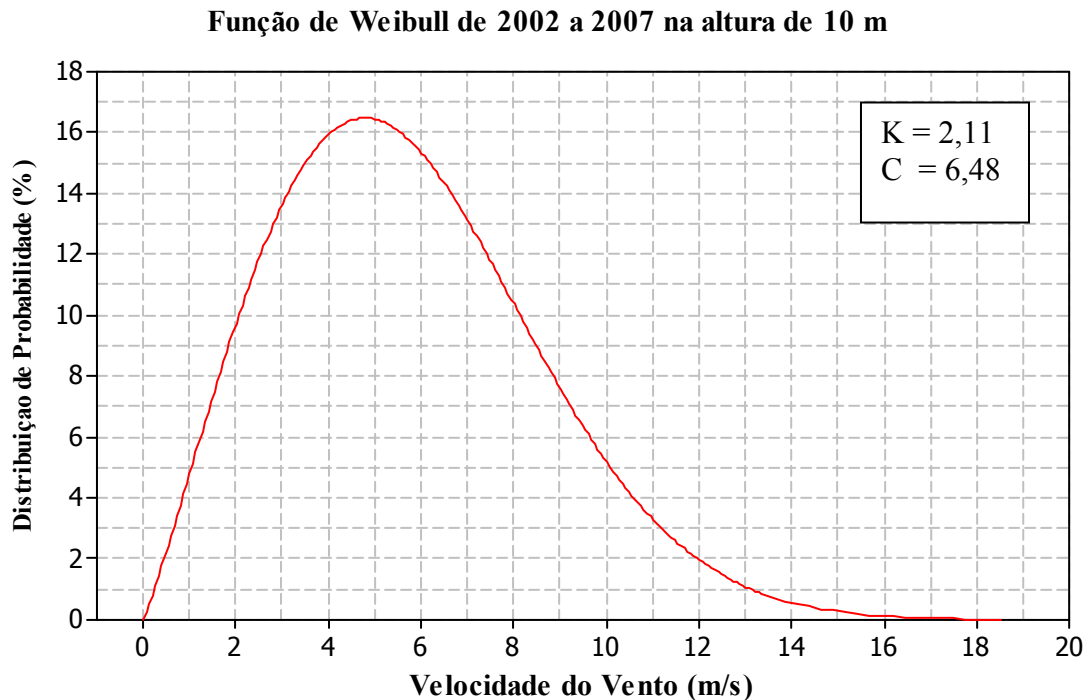


Gráfico 7: Distribuição de Weibull na estação 2 na altura de 10m no período 2002-2007.

De acordo com o Gráfico (7), a velocidade de maior probabilidade de ocorrer está em torno de 5 m/s. O fator de forma (K) médio encontrado foi de 2,11 e o fator de escala (C) de 6,48 m/s.

4. 1. 2. 7 Distribuição de Weibull para a velocidade do vento no período 2002-2007 na altura de 50 m.

Para a extrapolação da velocidade do vento para a altura de 50 m foi utilizada a "Lei Logarítmica".

Foi utilizado como comprimento da rugosidade do local o valor de 0,1 da classe 2 da Tabela (2).

A distribuição de Weibull apresentada na altura de 50m mostra a viabilidade de empreendimentos eólicos economicamente, pois os aerogeradores de grande porte têm altura de eixos em torno de 50 m. Nesta altura a velocidade média encontrada foi de 7,73 m/s.

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (CERPCH – Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidroelétricas).

O Gráfico (8) mostra a curva da função de Weibull para altura de 50 m na estação 2.

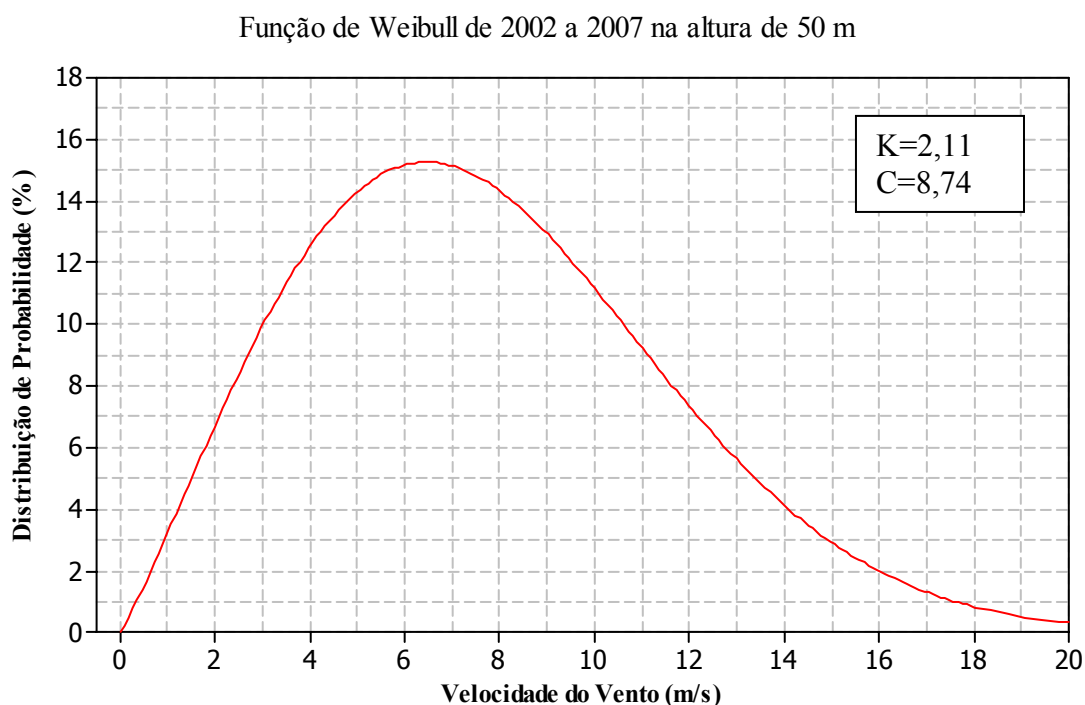


Gráfico 8: Distribuição de Weibull na estação 2 na altura de 50 m no período 2002-2007.

A velocidade do vento de maior probabilidade ocorrer é de aproximadamente 6,5 m/s, na altura de 50 metros. O fator de forma permaneceu constante, pois a velocidade na altura de 50 m é derivada de 10m. O fator de escala (C) de Weibull encontrado foi de 8,74, o que representa um bom valor de probabilidade de velocidade do vento, credenciando esta região para a implantação de empreendimentos eólicos de grande porte.

4. 1. 2. 8 Síntese dos resultados obtidos da análise estatística da estação 2

A Tabela (10) resume a análise sobre a velocidade média e direção dos ventos observados na altura do anemômetro (10m), na estação 2 do heliporto do Farol de São Thomé no período 2002-2007 com leituras diárias de 8 h às 18 h.

Tabela 10: Síntese da estatística da velocidade e direção dos ventos na estação 2 no período 2002-2007 nas alturas de 10m e 50m.

-	2002-2007		Trimestres (na altura de 10m)			
	Altura de 10m	Altura de 50m	JFM	AMJ	JAS	OND
Velocidade média (m/s)	5,73	7,73	5,96	4,57	5,81	6,43
Desvio padrão de V(m/s)	2,87	3,87	2,83	2,30	2,87	3,02
Fator de forma (K)	2,11	2,11	2,27	2,10	2,16	2,28
Fator de escala (C)	6,48	8,74	6,77	5,14	6,59	7,32
DPV(w/m²)	207	513	220	107	212	276
Direção predominante	NE 38%	NE 38%	NE 44%	NE 26%	NE 37%	NE 43%
Maior Valor de V (m/s)	20,58	27,8	18,52	16,42	18,00	20,57

A Velocidade média anual observada no período, Tabela (10), na altura do anemômetro (10 m) na estação do Heliporto do Farol de São Thomé ficou em 5,72 m/s bem acima do limite de 3 m/s, mínimo de velocidade para início de geração conforme a curva de potência da maioria das turbinas eólicas, enquanto que com a extrapolação para a altura de 50 m a velocidade média anual passou para 7,70 m/s de direção predominantemente nordeste, o que credencia esta região para a instalação de empreendimentos eólicos de pequeno e grande portes. O trimestre AMJ que corresponde ao período seco apresentou a menor velocidade média na altura de 10 m (4,57 m/s) e conseqüentemente uma DPV de 107 w/m².

Os valores de velocidades máximas observadas na Tabela (11) que se caracterizam por rajadas (velocidade superior a 15 m/s), correspondem as leituras efetuadas nas horas cheias e que são coincidentes com os horários das medições nesta estação.

4. 1. 3 Análise dos dados do NCEP/NCAR para as estações 1 e 2

O Gráfico (9) apresenta as velocidades médias da estação 1 no período de 1975 a 2005, dos dados referentes à medição e dos dados obtidos da re-análise do NCEP.

Pode-se verificar a semelhança dos gráficos. Considerou-se a altura padrão de 10m, e para tanto foi feita a extrapolação da altura de 2m para 10m.

Media Mensal na Lat 21.8030 S e Lon 41.2959 W
Estacao 1 periodo 1975 a 2005

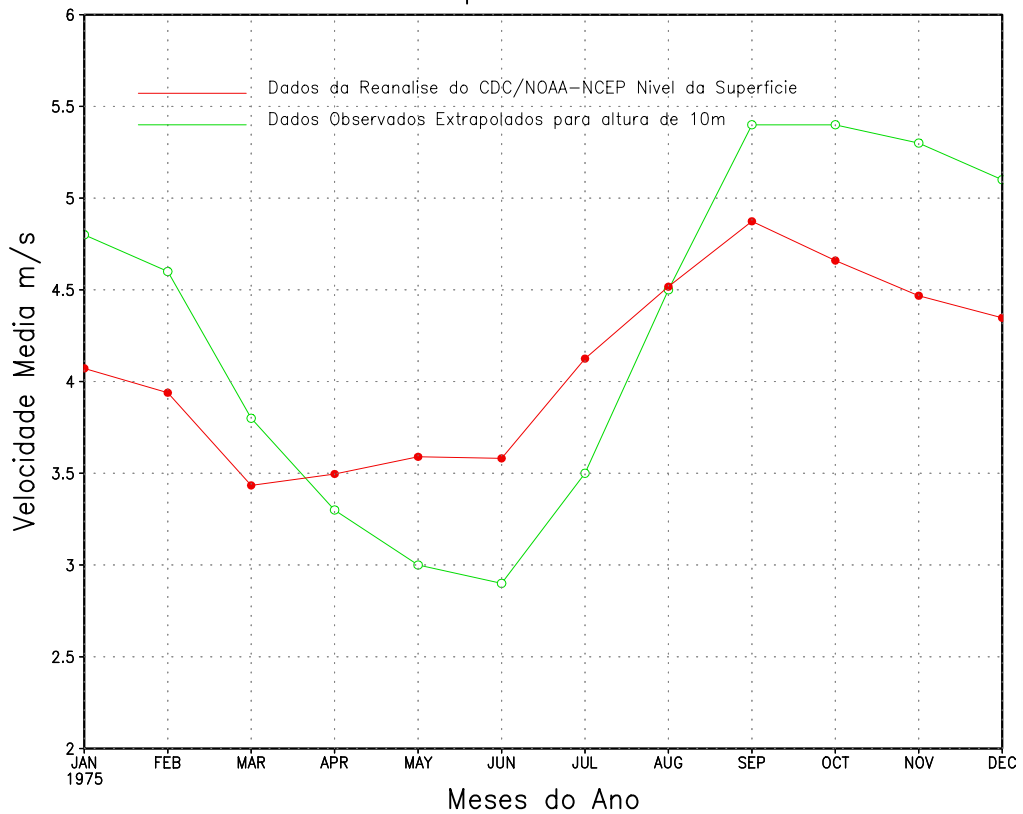


Gráfico 9: Velocidade média do vento da medição da estação 1 e da re-análise do NCEP, para as mesmas coordenadas no período 1975-2005.

Podemos observar no Gráfico (9) que a variação da velocidade média mensal observada na estação 1 acompanha as variações da velocidade média mensal dos dados da reanálise.

O Gráfico (10) apresenta as velocidades médias da estação 2 no período de 2002 a 2007, dos dados referentes à medição local e da re-análise do NCEP, na altura de 10 m. Neste caso considerou-se o período de 2002 a 2007 para coincidir com o período das medições efetuadas na estação. Pode-se verificar também a semelhança das duas curvas apresentadas neste gráfico.

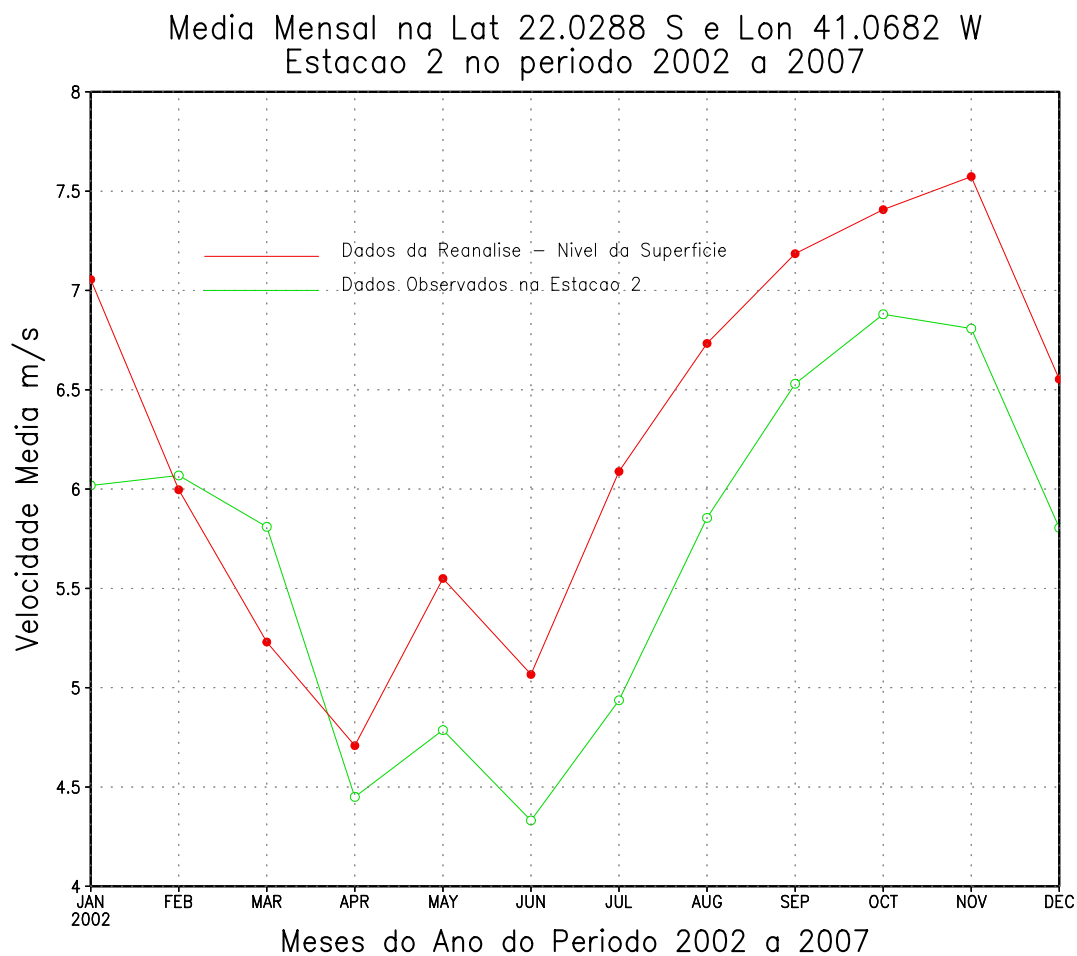


Gráfico 10: Velocidade média do vento da medição da estação 2, e da re-análise do NCEP, na altura de 10 m, para as mesmas coordenadas, no período 2002 - 2007.

O Gráfico (11) apresenta as velocidades médias da estação 2 no ano de 2002, dos dados referentes à medição local e da re-análise do NCEP, na altura de 10 m. Neste caso considerou-se o ano de 2002 apenas, para validação dos gráficos, onde se pode observar a grande semelhança em valores e na forma dos respectivos gráficos. Da mesma forma que no gráfico (12), onde a curva da velocidade média mensal observada ao longo do período acompanhou a tendência da curva representativa dos dados da re-análise.

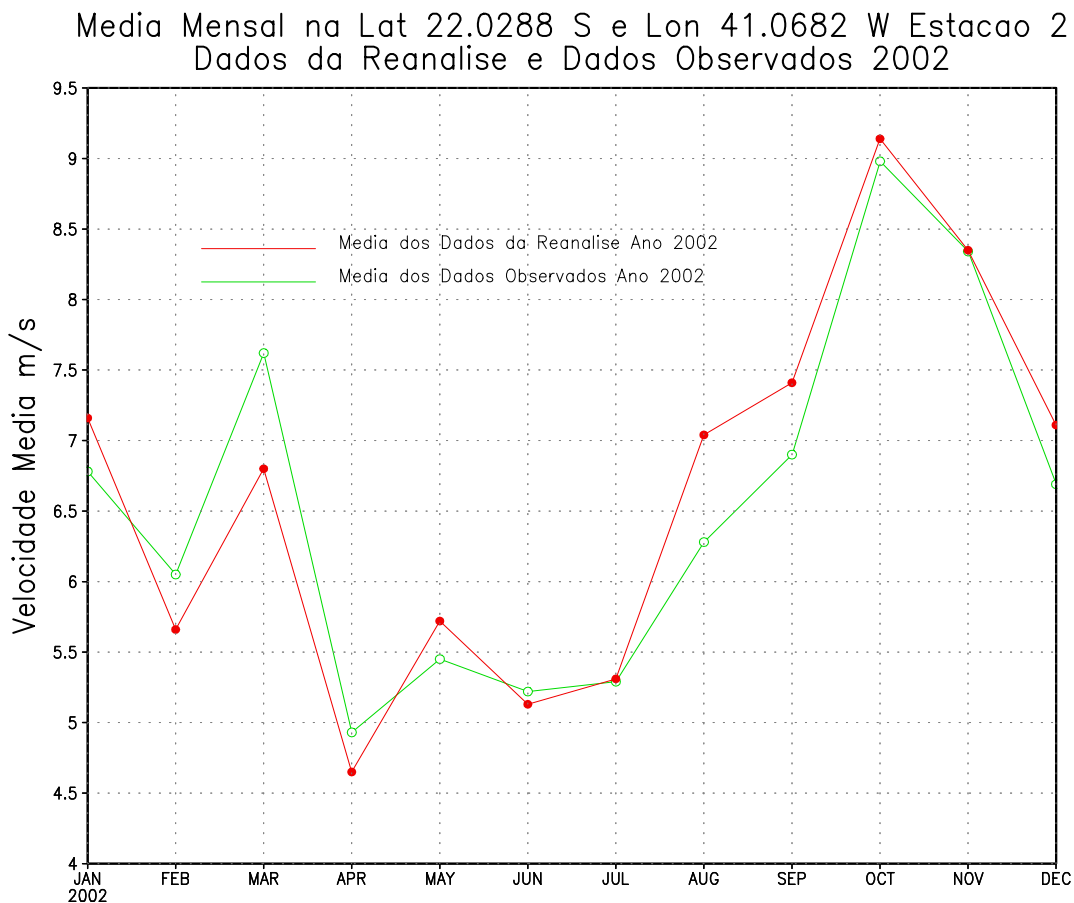


Gráfico 11: Velocidade média do vento para os dados da medição e da reanálise na estação 2 na altura de 10 m, no ano de 2002.

O Gráfico (12) apresenta as velocidades médias das estações 1 e 2 no período de 1948 até o presente, referentes aos dados da re-análise do NCEP. Também se verificou uma forte semelhança entre os Gráficos 12 e 13.

Observando o Gráfico (12) podemos constatar que a velocidade média nas coordenadas da estação 2 é superior à velocidade média da estação para estes dados obtidos da reanálise. Isto valida a análise devido a localização da estação 2 ser no litoral e a estação 1 na zona suburbana da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ. Comparando por exemplo os valores do mês de outubro neste gráfico, onde temos 5,5 m/s na estação 1 e 6,5 m/s na estação 2 e os valores para este mesmo mês no gráfico 3 onde encontramos 5,36 m/s e 6,88 m/s.

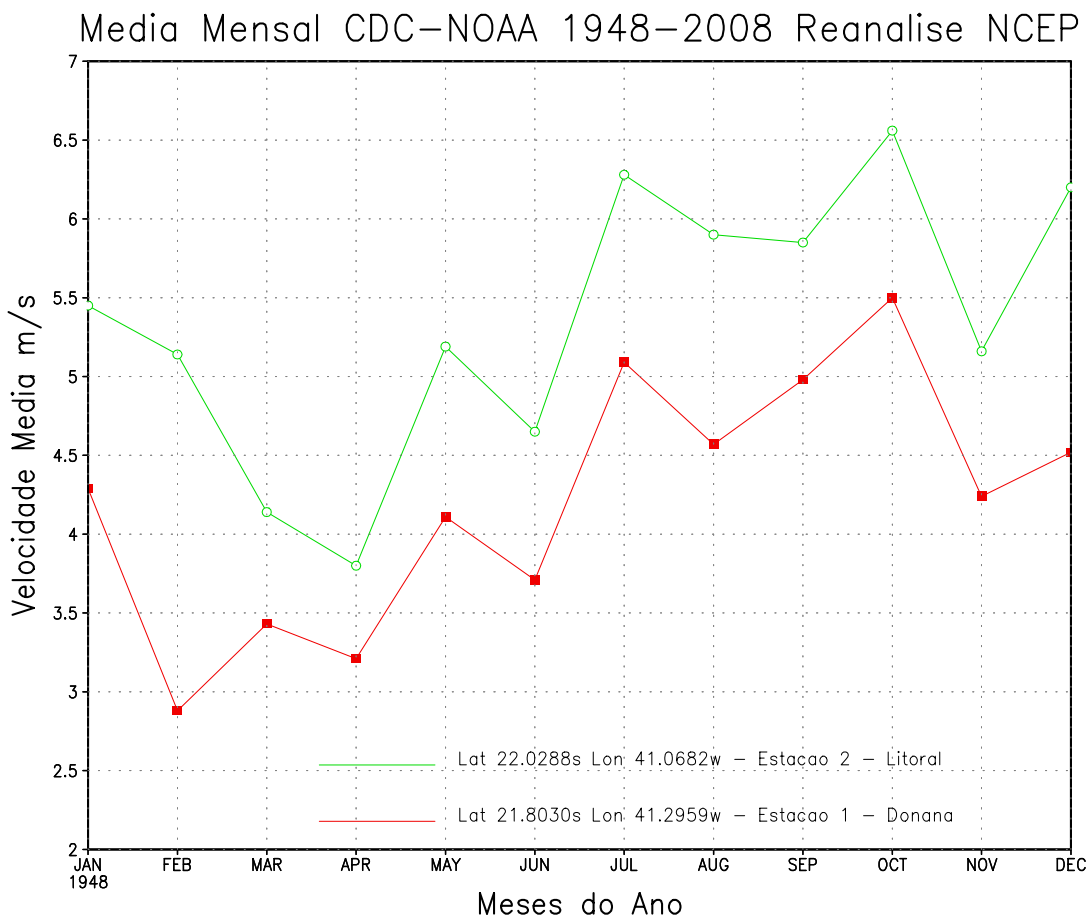


Gráfico 12: Velocidade média do vento dos dados da re-análise do NCEP nas coordenadas das estações 1 e 2, no período 1948-2008.

O Gráfico (13) apresenta as velocidades médias observadas a 2 m e extrapoladas para 10 m, na estação 1 no período de 1975 a 2005, e a observada na estação 2 de 2002 a 2007, uma vez que as medições efetuadas nas respectivas estações se referem a estes períodos.

Comparando o Gráfico (12), dados da reanálise para as duas estações com o Gráfico (13) dados das medições locais, também para as duas estações podemos constatar uma grande semelhança entre eles.

Media Mensal dos dados observados nas Estacoes 1 e 2

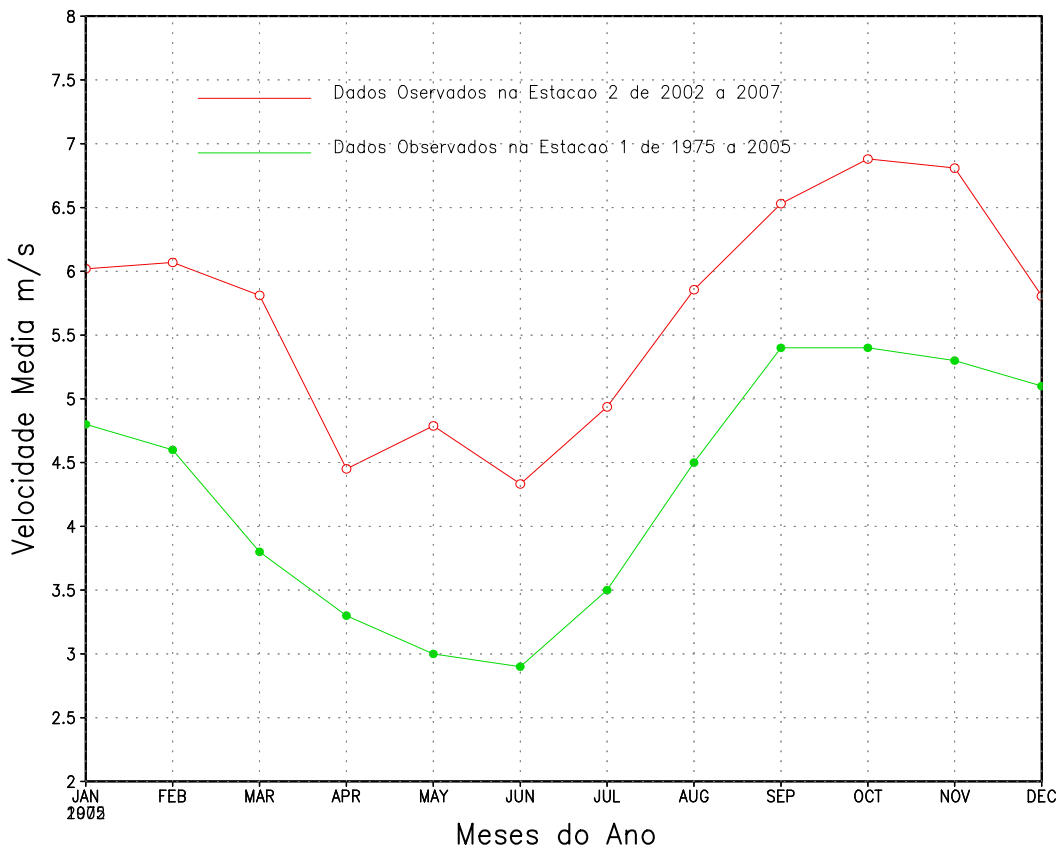


Gráfico 13: Velocidade média do vento dos dados das medições nas estações 1 e 2 nos períodos 1975-2005 e 2002-2007, respectivamente.

4. 1. 4 Avaliação do Potencial Eólico na Região da Estação 2

Na Tabela (11) são apresentados os resultados da análise estatística aplicada sobre a velocidade do vento para os meses do ano no período 2002 – 2007, obtendo a potência eólica disponível por unidade de área em W/m^2 (DPV), nas alturas de 10 m e 50 m, as velocidades médias mensais o desvio padrão da média das velocidades em cada mês e o fator de forma K de Weibull. O fator de forma K pode ser visto também no Gráfico (14).

Tabela 11: Análise estatística sobre as médias mensais da velocidade do vento, na estação 2.

Período	V(m/s)		D.P.V. (w/m^2)		D.P(m/s)		K
	10m	50m	10m	50m	10m	50m	
Janeiro	6,03	8,14	220	526	2,77	3,74	2,32
Fevereiro	6,08	8,21	234	561	2,94	3,98	2,19
Março	5,80	7,88	201	488	2,74	3,65	2,30
Abril	4,47	6,03	99	238	2,22	3,00	2,14
Mai	4,79	6,46	123	297	2,41	3,25	2,10
Junho	4,35	5,88	93	224	2,22	2,99	2,08
Julho	4,94	6,67	140	320	2,59	3,50	2,01
Agosto	5,86	7,91	198	487	2,66	3,60	2,35
Setembro	6,54	8,83	282	698	3,06	4,13	2,28
Outubro	6,88	9,29	328	811	3,24	4,36	2,27
Novembro	6,75	9,11	305	752	3,12	4,20	2,31
Dezembro	5,80	7,83	194	475	2,57	3,47	2,39
2002-2007	5,73	7,73	205	502	2,87	3,87	2,11

O fator de forma (K) foi calculado pela função de Weibull.

A associação de velocidade média com o fator de forma k de weibull determina o potencial eólico de uma região. Neste sentido analisando a Tabela (11) pode-se notar que a região estudada apresenta boas condições para a implantação de empreendimentos eólicos. Foram encontrados valores de K variando desde 2,01 no mês de julho até 2,39 no mês de dezembro, o que confirma maior regularidade no regime de ventos no trimestre OND.

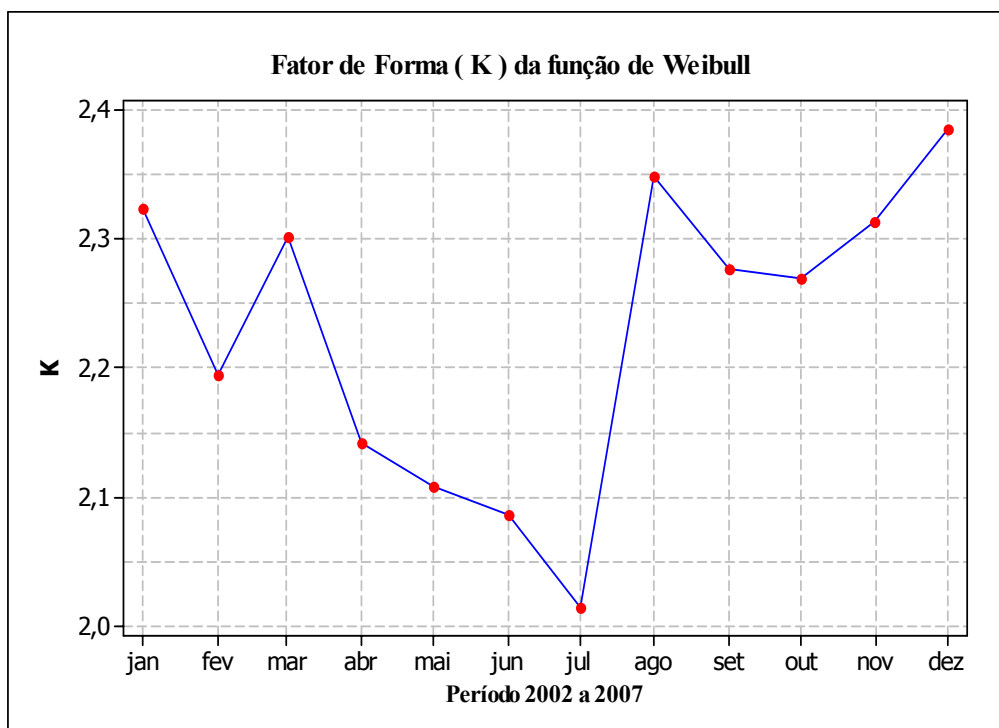


Gráfico 14: Variação do fator de forma (K) de Weibull mensal no período 2002-2007, na estação 2.

(JUSTUS et al., 1978) observaram que o valor de “k” está inversamente relacionado com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade média, o que implica baixas variâncias se “k” for alto e vice-versa, (Leite, M. L. et al., 2006).

Estudo para o litoral do Estado de Santa Catarina, (Kuhnen et al., 2004), constatou para 16 estações analisadas com anemômetros colocados a 30 e 48 m, velocidades médias anuais entre 5,70 m/s e 8,53 m/s. O fator de forma (K) de Weibull encontrado para esta região nas medições efetuadas ficaram entre 1,5 e 2,5. Nota-se então bastante semelhança com os valores de velocidades médias e fator de forma encontrados na região do litoral do Estado do Rio de Janeiro.

4. 1. 5 Estudo de caso com aerogeradores típicos de grande e pequeno porte.

4. 1. 5. 1 Aerogeradores de grande porte

Nesta análise consideramos o aerogerador da E-33 da ENERCON de 330 KW, muito utilizado em empreendimentos eólicos de grande porte.

O Gráfico (15) mostra a curva de potência típica do aerogerador E-33.

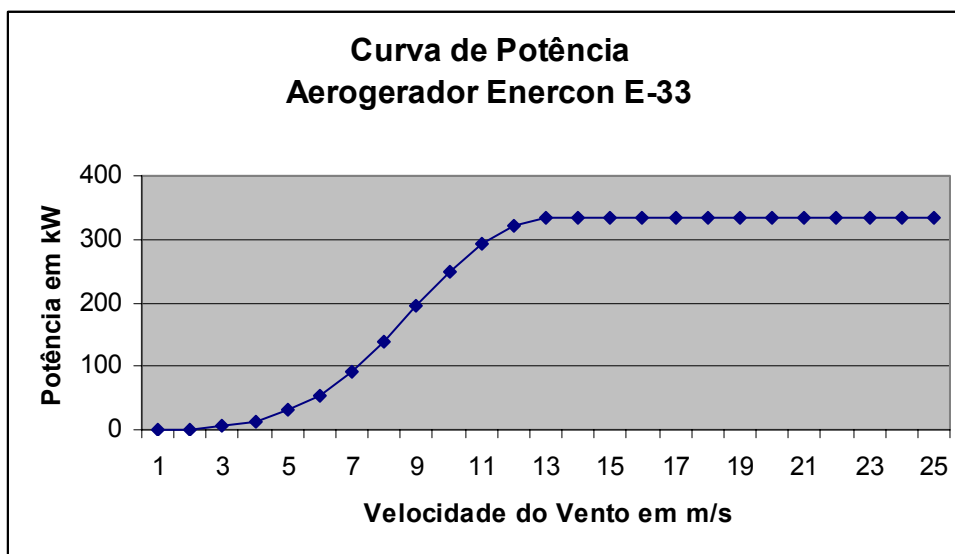


Gráfico 15: Curva de potência do aerogerador ENERCON E-33.

Fonte: ENERCON http://www.enercon.de/en/_home.htm

A velocidade de partida (início de geração) situa-se em torno de 3 m/s e a velocidade de máxima potência em 13 m/s.

Na Tabela (12) são apresentados os dados técnicos do aerogerador ENERCON E-33 de 330 kW.

Tabela 12: Dados técnicos do aerogerador ENERCON E-33 de 330 kW.

Fonte: ENERCON: http://www.enercon.de/en/_home.htm

Potência Nominal	330 kW
Diâmetro do rotor	33,4 m
Altura do eixo do rotor	44 - 50 m
Número de pás	3
Área varrida pelas pás	876 m ²
Velocidade do rotor	Variável 18 – 45 RPM
Gerador	Gerador em anel ENERCON
Velocidade de partida	3 m/s
Velocidade de corte	24 m/s

Considerando o diâmetro do rotor do conjunto E-33 de 33,4 m e a altura do eixo do rotor de 50 m, e analisando os dados da velocidade para a altura de 50 m na estação 2, concluiu-se que é viável economicamente o aproveitamento eólico elétrico na região estudada. Conforme a distribuição da Tabela (13), para as classes de velocidades superiores a 6 m/s encontrou-se um valor total superior a 63%

Tabela 13: Distribuição de frequência da velocidade do vento estação 2, altura de 50 m.

Classes de Velocidade (m/s)	Frequência (N-horas)	Percentual (%)
< 2	810	3,17
2 a 4	3423	13,42
4 a 6	5108	20,02
6 a 8	4887	19,15
8 a 10	4617	18,10
10 a 12	2812	11,02
12 a 14	2478	9,71
> 14	1378	5,41
Total	25513	100

No histograma apresentado no Gráfico (16) encontrou-se uma velocidade média de 7,74 m/s e um desvio padrão de 3,87 para uma amostra de 25513 valores (horas de medições realizadas) no período diurno de 6 h às 18 h (hora local) de 2002 a 2007, para a velocidade extrapolada para a altura de 50 m.

Para a extrapolação da velocidade do vento para a altura de 50 m foi utilizada a "Lei Logarítmica".

Foi utilizado como comprimento da rugosidade do local o valor de 0,1 da classe 2 da Tabela 2

A distribuição de Weibull apresentada para a velocidade média na altura de 50m mostra a viabilidade econômica de empreendimentos eólicos nesta faixa de potência (330 kW), cujos eixos dos rotores das turbinas estão colocados em alturas de 40 a 50 m.

Histograma da velocidade do vento na altura de 50m, na estação 2

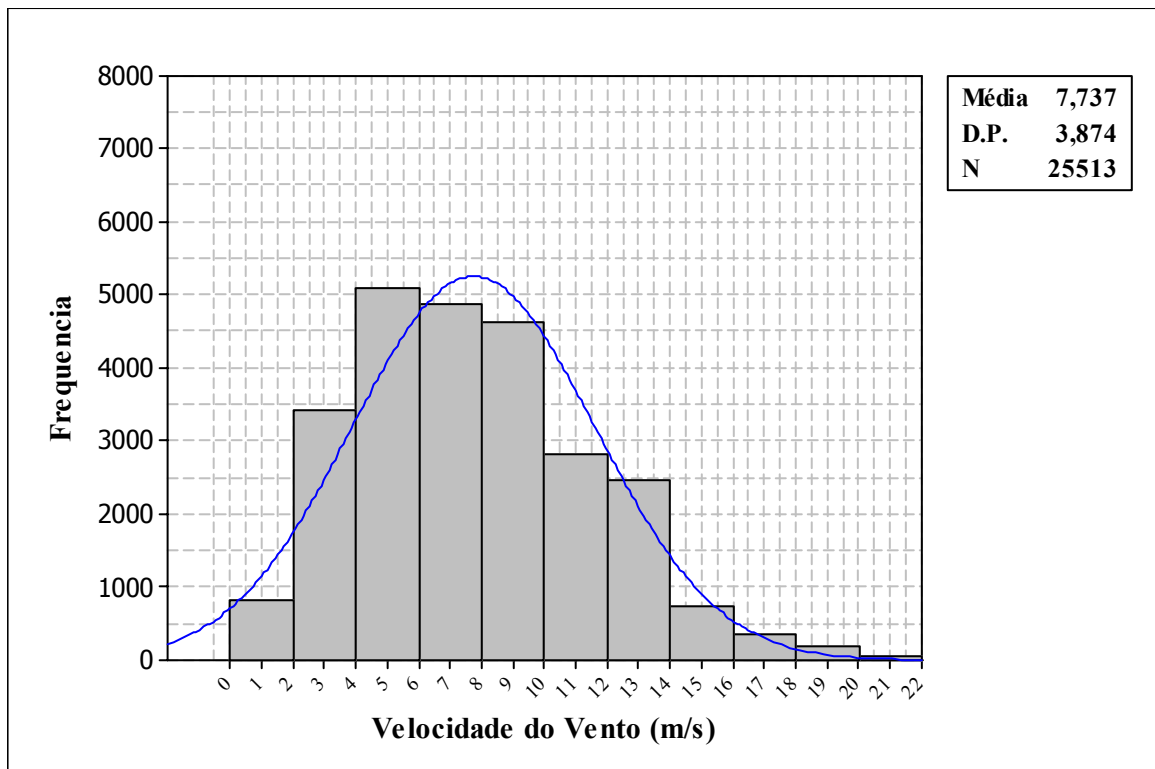


Gráfico 16: Histograma da distribuição normal da velocidade do vento na altura de 50m

Como mostra a Tabela (13) e o Gráfico (16), a velocidade do vento na faixa de 6 a 10 m/s apresentou uma frequência percentual de 37,25 %, e na faixa de 4 a 14 m/s apresentou uma frequência total de 78%. A velocidade média e o desvio padrão foram respectivamente 7,73 m/s e 3,87 m/s, o que credencia esta região para instalações de aerogeradores de grande porte.

A distribuição de frequências das velocidades apresentada na Tabela (13) pode ser visualizada no histograma apresentado no Gráfico (16).

4. 1. 5. 2 Aerogeradores de pequeno porte

Os aerogeradores de pequeno porte são utilizados para consumo residencial e rural entre 400 e 7000 Watts. São instalações simples em torres de 7 a 15 metros, podendo ser em postes de madeira (eucalipto), facilmente encontrados na região. Em baixas altitudes, para regimes de ventos pouco intensos entre 4,5 e 7 m/s deverá ser analisado a utilização de geradores de

baixa rotação (ímãs permanentes). Será tomado como exemplo o Aerogerador modelo GERAR 246 da ENERSUD cujos dados técnicos estão representados na Tabela (14)

Tabela 14: Dados técnicos do aerogerador GERAR246 da ENERSUD.

Diâmetro do rotor	2,46 m
Potência a 12 m/s (watt)	1000 w
Início de rotação	2,2 m/s
Início de geração	3 m/s
Velocidade nominal	12 m/s
Velocidade de corte	20 m/s
Rotações a 12 m/s	650
Nº de pás	3
Material das Pás	Fibra de vidro
Controle de Velocidade	Estol ativo
Proteção p/ altas Velocidades	Controle de passo
Sistema Magnético	Neodímio
Sistema Elétrico	Trifásico
Tensão de Saída	12/24/48/220
Topologia do Alternador	Fluxo axial
Peso Total	30 kg
Proteção Antioxidante	Sim

Fonte: ENERSUD (Fabricante de Aerogeradores)
Disponível em: <http://www.enersud.com.br>

O Gráfico (17) apresenta a curva de potência para o aerogerador modelo GRW246 da ENERSUD de 1000 w de potência nominal.



Gráfico 17: Curva de potência do aerogerador GRW246.
 Fonte: ENERSUD. Disponível em: <http://www.enersud.com.br/produtos.asp>

O Gráfico (18) apresenta a curva de produção mensal de energia para o aerogerador modelo GRW246 da ENERSUD de 1000 w de potência nominal.

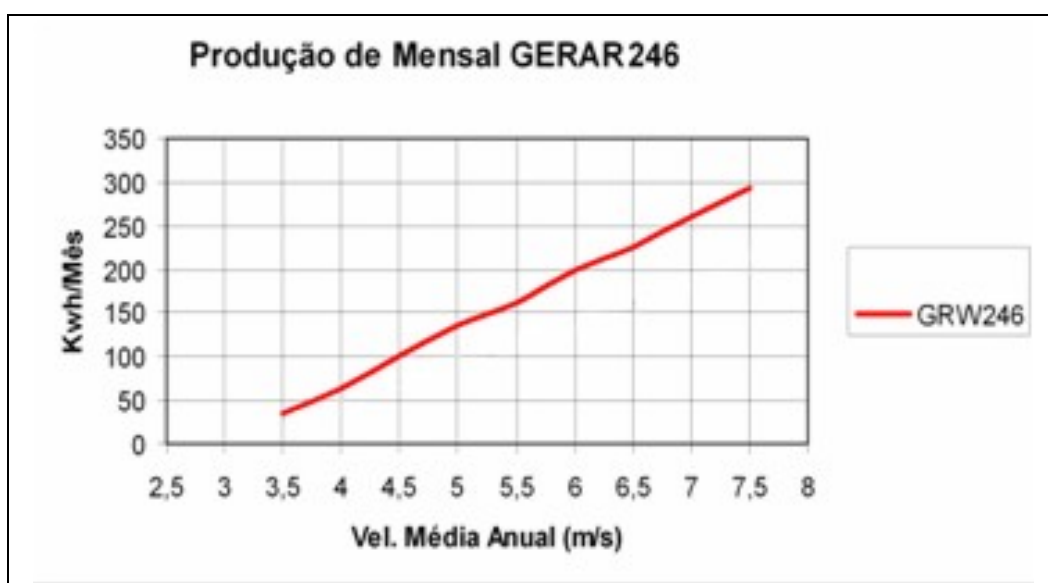


Gráfico 18: Curva de produção mensal de energia do aerogerador GRW246.
 Fonte: ENERSUD Disponível em: <http://www.enersud.com.br/produtos.asp>

A curva de potência do aerogerador GRW246 do Gráfico (17), apresenta uma característica compatível com a distribuição de freqüência da velocidade média encontrada na região na altura de 10m (Gráfico 19) e Tabela (15)

A curva de produção mensal de energia desse mesmo aerogerador (Gráfico 18), também mostra compatibilidade com os dados de distribuição de freqüência da velocidade média encontrada na região na altura de 10m (Gráfico 19) e Tabela (15), ou seja, uma produção

média mensal de 200 kWh de energia, valor este que está dentro da média de consumo residencial rural para a região.

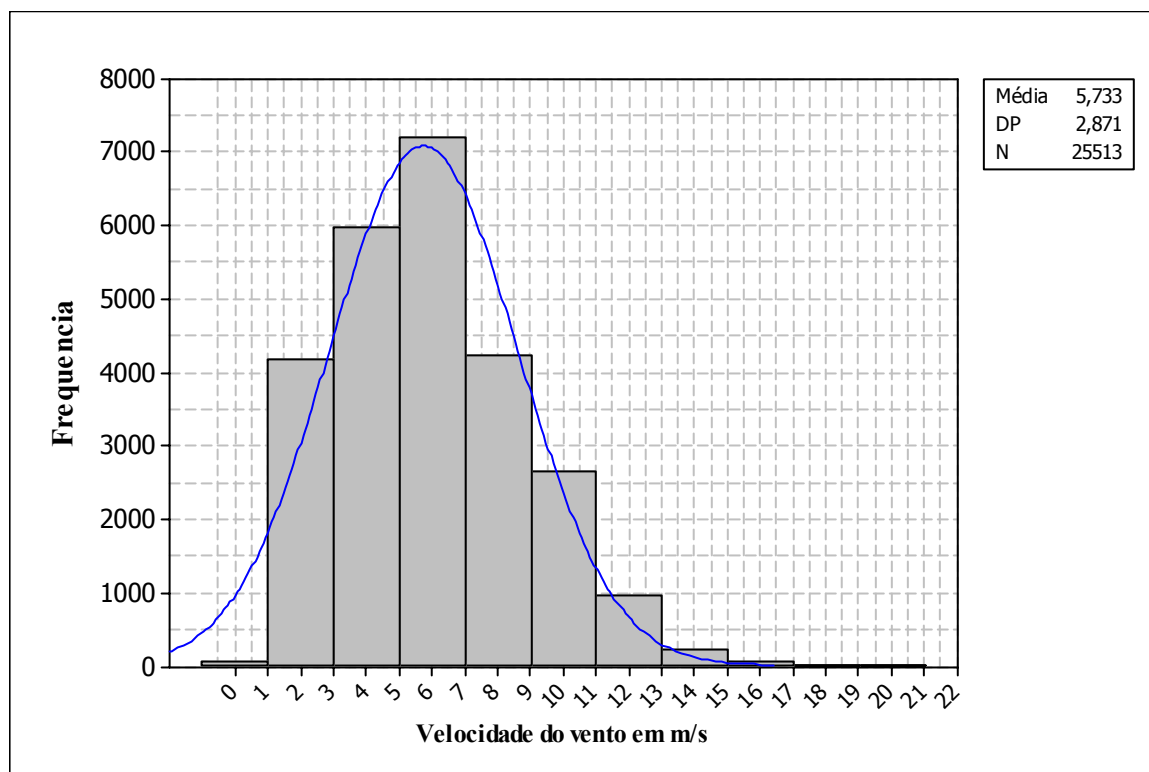


Gráfico 19: Histograma da distribuição normal da velocidade do vento na altura de 10m.

Tabela 15: Distribuição de frequência da velocidade do vento na estação 2 na altura de 10 m.

Classes de Velocidade (m/s)	Frequência (N-horas)	Percentual (%)
0-1	65	0,25
1-3	4172	16,35
3-5	5973	23,41
5-7	7212	28,26
7-9	4238	16,61
9-11	2649	10,38
11-13	947	3,71
13-15	208	0,81
15-17	49	0,19
Total	25513	100

Na Tabela (15) é mostrada a distribuição de frequência da velocidade média do período 2002-2007 na estação 2, na altura de 10m, correspondente ao histograma do Gráfico (19).

Para a altura de 10 metros a distribuição da velocidade apresentou maior concentração na faixa de 5 m/s a 7 m/s exclusive (28,26%), e na faixa entre 5 m/s e 11 m/s exclusive, apresentou uma frequência total de 55,25%. O que credencia a região para instalações de aerogeradores na faixa de 1 kW a 7 kW de potência nominal. A velocidade média nesta altura ficou em 5,73 m/s e desvio padrão de 2,87 m/s.

4. 1. 6 Síntese da estatística da direção predominante do vento na estação 2.

4. 1. 6. 1 A rosa dos ventos da estação 2

Os gráficos rosa dos ventos e suas respectivas tabelas apresentam a distribuição de frequência da velocidade e direção do vento para todo o período analisado 2002-2007 nas alturas de 10m e 50m, e nos trimestres e meses do ano para a altura de 10m.

Os gráficos da rosa dos ventos foram elaborados pelo aplicativo OWC Wizard. Versão 2.0.46 (DEMO), baixado do site www.wasp.dk. Em 16/09/2008. Este aplicativo faz parte do programa WAsP© (Mortensen et al., 2001), versão 7.3, 1987-2002 Riso National Laboratory, Denmark. Versão disponibilizada para demonstração (DEMO).

4. 1. 6. 2 Rosa dos ventos da estação 2 na altura de 10m

No Gráfico (20) e na Tabela (16) estão apresentados o gráfico da rosa dos ventos e a tabela de distribuição, respectivamente, que fornecem a estatística das frequências de distribuição da velocidade e a DPV média do vento por direção predominante, para todas as medições efetuadas na estação 2 – Heliporto do Farol de São Thomé no período 2002-2007, na altura de 10m.

Para elaboração deste gráfico foram computadas todas as medições efetuadas no período diurno de 6 h às 18 h (hora local), totalizando 25513 valores.

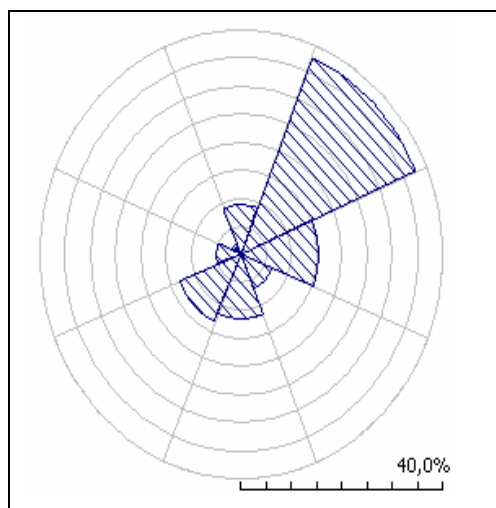


Gráfico 20: Rosa dos ventos para o período 2002-2007 na altura de 10m.

A Tabela (16) mostra a distribuição de freqüência da velocidade e da densidade de potência do vento (DPV) disponível por setor de direção do vento para a altura de 10m.

Tabela 16: Distribuição de freqüência da direção do vento no período 2002 - 2007 na altura de 10 m na estação 2.

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	-
Freqüência (%)	9	38	15	7	11	13	5	2	100
V(m/s)	4,5	7,01	5,43	3,79	4,92	6,03	3,45	2,46	5,73
DPV (w/m²)	115	318	181	49	116	219	70	21	207

DPV. – densidade de potência do vento

4. 1. 6. 3 Rosa dos ventos da estação 2 na altura de 50m

No Gráfico (21) e na Tabela (17) estão apresentados o gráfico da rosa dos ventos e a tabela de distribuição, respectivamente, que fornecem a estatística das freqüências de distribuição da velocidade e a DPV média do vento por direção predominante, para todas as medições efetuadas na estação 2 – Heliporto do Farol de São Thomé no período 2002-2007, na altura de 50m.

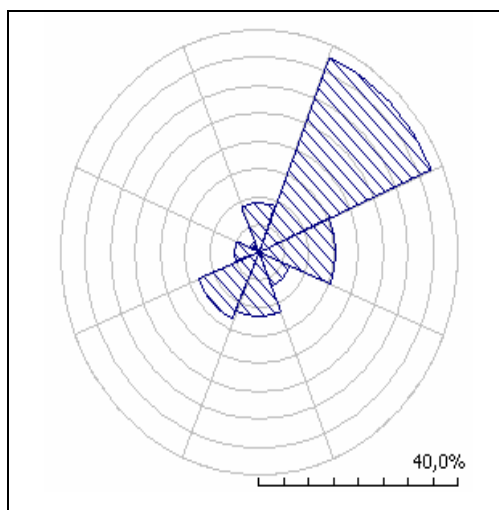


Gráfico 21: Rosa dos ventos para o período 2002-2007 na altura de 50m.

Na Tabela (17) é apresentada a distribuição da velocidade média, a densidade de potência média, as freqüências das velocidades para cada setor da direção dos ventos.

Tabela 17: Distribuição de freqüência da direção do vento no período 2002 - 2007 na altura de 50 m na estação 2

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	-
Freqüência (%)	9	38	15	7	11	13	5	2	100
V(m/s)	6,26	9,45	7,32	5,13	6,78	8,07	4,48	3,06	7,73
DPV (w/m²)	284	794	447	118	283	542	168	48	513

DPV. – densidade de potência do vento

Analisando os dados da Tabela (17), vemos que o setor com direção predominante do vento foi o de centro em 45° direção nordeste (NE), com uma freqüência de 38%, seguido do setor com centro de 90° direção leste (L), com 15 % da freqüência. O terceiro setor com maior freqüência na direção do vento (13%) foi o setor sudoeste (SO) com centro em 225°.

Considerando o quadrante norte / nordeste, entre os angulos 0° e 90° ter-se-á uma predominância de 62% de freqüência da direção dos ventos neste quadrante.

Na Tabela (16) na altura de 10m obtivemos os seguintes resultados: A velocidade média do vento na direção predominante nordeste (NE) ficou em 7,01 m/s. A segunda maior

velocidade média foi de 6,03 m/s na direção sudoeste (SO). A velocidade média considerando todos os setores de direção

A densidade de potência média disponível na direção predominante foi de 318 w/m² para o vento na direção nordeste e de 219 w/m² na direção sudoeste.

Considerada a extrapolação da velocidade para a altura de 50 m, Tabela (17), teremos para a direção predominante (nordeste), os seguintes valores:

Velocidade média: 9,45 m/s

Potência disponível: 794 w/m² com 38% de frequência.

Na segunda direção com maior frequência (sudoeste), tiveram os seguintes valores:

Velocidade média: 8,07 m/s

Densidade de potência média do vento disponível: 542 w/m²

4. 1. 6. 4 Rosa dos ventos trimestral da estação 2 no período 2002-2007

Os Gráficos (22.a) a (22.d) apresentam a rosa dos ventos e as respectivas Tabelas (18.a) a (18.d) das distribuições de frequências da velocidade e da direção do vento por direção referentes aos períodos trimestrais de 2002-2007 para as medições efetuadas na estação 2.

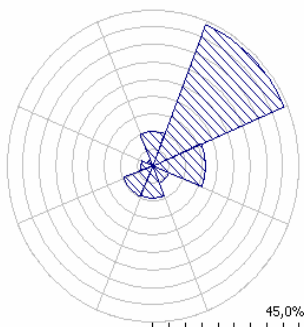


Gráfico 22.a: Rosa dos ventos do trimestre JFM 2002-2007 na altura de 10m

Tabela 18.a: Rosa dos ventos do trimestre JFM

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	-
F(%)	10	44	16	5	9	10	4	2	100
V(m/s)	4,89	7,24	6,22	3,96	4,59	5,53	3,25	3,22	5,96
DPV (w/m ²)	122	316	252	53	92	161	47	41	221

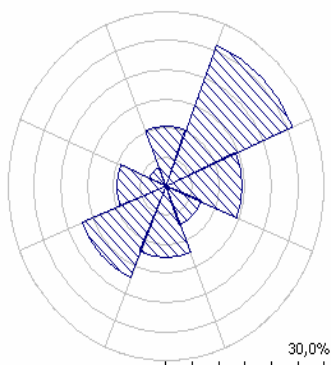


Gráfico 22.b: Rosa dos ventos do trimestre AMJ 2002-2007 na altura de 10m

Tabela 18.b: Rosa dos ventos do trimestre AMJ

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	-
F(%)	10	26	14	7	12	17	9	3	100
V(m/s)	3,34	5,32	4,31	3,42	4,69	5,72	3,35	2,26	4,57
DPV (w/m ²)	50	143	83	34	96	186	67	17	107

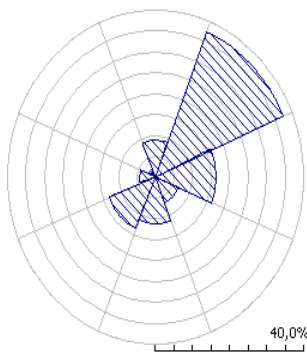


Gráfico 22.c: Rosa dos ventos do trimestre JAS 2002-2007 na altura de 10m.

Tabela 18.c: Rosa dos ventos do trimestre JAS

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	-
F(%)	9	37	16	6	11	13	5	2	100
V(m/s)	4,74	6,85	5,27	3,79	4,99	6,83	3,58	2,2	5,81
DPV (w/m ²)	138	297	161	47	119	313	93	13	212

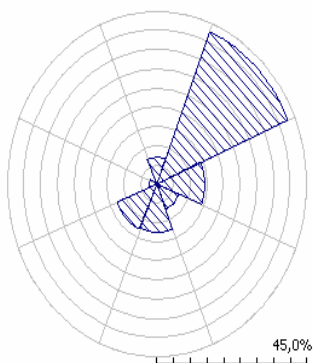


Gráfico 22.d: Rosa dos ventos do trimestre OND 2002-2007 na altura de 10m.

Tabela 18.d: Rosa dos ventos do trimestre OND.

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	-
F(%)	7	43	14	7	12	13	3	1	100
V(m/s)	5,1	7,93	5,9	4,04	5,29	5,99	3,77	2,46	6,43
DPV (w/m ²)	158	430	223	61	145	199	69	21	276

4. 1. 7 Síntese dos resultados da direção do vento nos períodos trimestrais, na estação 2.

Trimestre JFM

O Gráfico (23.a) apresenta a rosa dos ventos do trimestre JFM relativo aos anos de 2002 a 2007, com um total de 5850 valores observados neste período.

Observando os dados para o primeiro trimestre, pode-se concluir: Neste trimestre a direção do vento se mostrou mais concentrada na direção nordeste.

A direção predominante dos ventos neste período foi de nordeste com 44% de frequência, seguido de leste com 16%.

O quadrante que compreende os setores de centro em 0° , 45° e 90° totalizaram uma frequência de 70%, neste trimestre.

A velocidade média teve o seu maior valor também no setor de 45° (nordeste), com 7,24 m/s, seguido do setor de 90° (leste), com 6,2 m/s.

A potência disponível no setor de direção predominante foi de 315 w/m^2 .

A potência média disponível durante todo o período do primeiro trimestre dos anos 2002 a 2007, considerando todos os setores de direção dos ventos foi de 220 w/m^2 .

A velocidade média do trimestre foi de 5,94 m/s.

Nota-se pela observação do Gráfico (23.a) a grande concentração dos ventos no setor de direção nordeste, compreendendo os ângulos entre 0° e 90° , com uma frequência de 70% dos ventos.

Trimestre AMJ

O Gráfico (23.b) apresenta a rosa dos ventos do trimestre de abril a junho relativo aos anos de 2002 a 2007, com um total de 5915 valores observados neste período.

Neste trimestre a direção do vento se mostrou com uma distribuição mais uniforme em todos os setores da rosa dos ventos, não ficando muito concentrado na direção nordeste. Na Tabela (18.b), pode-se verificar esta distribuição.

Embora com menor valor em relação ao primeiro trimestre, ainda assim o setor de direção nordeste ficou com a maior frequência percentual (26%), seguido pelo setor sudoeste (17%). Nota-se nesta época maior presença do vento sudoeste.

A velocidade média teve maior intensidade no setor sudoeste, com 5,72 m/s, seguido pelo setor de direção nordeste com 5,32 m/s.

A densidade de potência média disponível neste trimestre apresentou um valor abaixo da média devido a uma menor velocidade dos ventos nesta época. Observando a Tabela (18.b) tem-se 186 w/m² para o setor de direção sudoeste, seguido de 143 w/m² para o setor de direção nordeste, e um valor médio para o trimestre, considerando todas as direções, de 107 w/m².

Trimestre JAS

O Gráfico (23.c) apresenta a rosa dos ventos do trimestre de julho a setembro relativo aos anos de 2002 a 2007, com um total de 6773 valores observados neste período.

Analisando os dados pode-se verificar que o terceiro trimestre do ano apresentou a melhor média de velocidade do vento com maior densidade de potência disponível na direção sudoeste, com 6,83 m/s e 313 w/m², embora com menor valor de distribuição de frequência em relação ao setor nordeste.

A velocidade média nos setores de direção nordeste e sudoeste predominaram, com 6,83 m/s e 5,85 m/s, respectivamente. A velocidade média do trimestre ficou em 5,72 m/s.

A densidade de potência média disponível neste trimestre apresentou um valor de 212 w/m², conforme mostra a Tabela (18.c).

Trimestre OND

Analisando o Gráfico (23.d) pode-se verificar no trimestre de outubro a dezembro os melhores resultados quer seja na velocidade média como na densidade de potência média. A maior concentração dos ventos prevaleceu no setor de direção nordeste com 43% de frequência. Se for considerado o quadrante nordeste obtém-se um total de 64 % da frequência neste trimestre. Também a velocidade dos ventos no setor nordeste apresentou a mais alta média com 7,93 m/s. O setor sudoeste embora com menor frequência 13%, apresentou a segunda maior velocidade média com 5,99 m/s.

O trimestre OND apresentou a melhor média de densidade de potência com 430 w/m².

JFM se refere aos meses de janeiro-março, AMJ aos meses de abril-junho, JAS aos meses de julho-setembro e OND aos meses de outubro-dezembro.

4. 1. 8 Rosa dos ventos dos períodos mensais de 2002-2007 na estação 2.

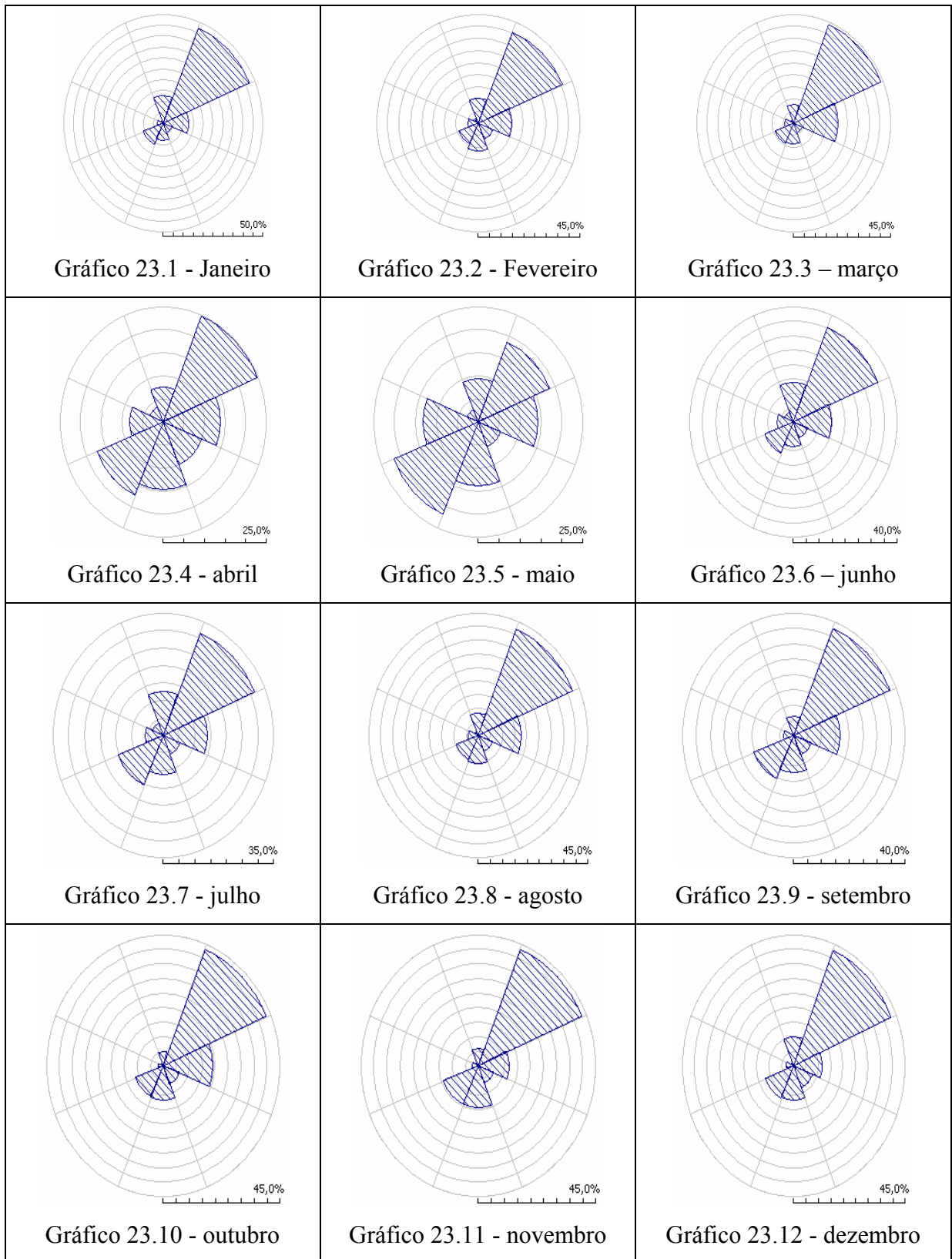


Gráfico 23: Rosa dos ventos mensal para o período 2002-2007 na estação 2.

Tabela 19: Distribuição de freqüência da direção do vento na estação 2.
Período janeiro de 2002 a dezembro de 2007.

Direção		N	NE	L	SE	S	SO	O	NO
FREQÜENCIA	Janeiro	13	47	13	5	8	11	3	1
	Fevereiro	10	40	15	7	11	9	5	2
	Março	8	44	21	4	9	9	4	2
	Abril	8	25	14	10	15	17	8	4
	Maiο	9	19	14	6	14	22	13	3
	Junho	14	35	15	6	8	12	6	4
	Julho	12	31	14	6	11	15	6	4
	Agosto	8	42	18	6	10	10	4	2
	Setembro	6	38	17	7	12	15	4	1
	Outubro	5	43	19	7	12	11	2	1
	Novembro	6	43	12	6	14	15	3	1
	Dezembro	10	43	11	8	12	12	3	1

Pela análise dos resultados mensais (Gráficos 24.1 – 24.12 e Tabela 19), observou-se a forte tendência do vento na direção nordeste (NE) na faixa de 45 % de freqüência seguida pela direção leste (L). Observou-se também o quadrante nordeste (NE) de 0 a 90 graus onde foi encontrado um total aproximado de 65% de freqüência na direção do vento.

O mês de maio, início do período seco, ocorre uma maior incidência de ventos de direção sudoeste (SO), com 22 % de freqüência.

Nos demais meses do ano confirma a forte predominância na direção nordeste (NE).

O mês de janeiro apresentou a maior ocorrência na distribuição dos ventos para a direção nordeste (NE), com 47% .

4. 1. 9 Média mensal da velocidade no período 2002 – 2007 na estação 2 na altura de 10m por setor da rosa dos ventos.

Tabela 20: Velocidade média mensal do período 2002-2007, na altura de 10m, na estação 2, por setor da rosa dos ventos.

Mês	Velocidade média (m/s)							
	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO
Janeiro	5,51	7,23	5,91	4,07	4,25	5,49	3,28	2,99
Fevereiro	4,5	7,81	6,84	4,06	4,82	5,17	2,99	3,17
Março	4,29	6,77	6,02	3,65	4,62	5,91	3,43	3,49
Abril	3,38	5,4	4,52	3,6	4,69	5,1	2,99	2,37
Maió	3,63	5,37	4,04	3,3	5,01	6,39	3,91	2,36
Junho	3,16	5,24	4,39	3,26	4,15	5,45	2,67	2,09
Julho	3,6	5,69	4,59	3,54	4,89	6,55	3,18	2,29
Agosto	5,14	6,78	5,24	3,74	5,2	6,71	3,86	2,16
Setembro	6,49	7,87	5,65	4,02	4,92	7,15	3,87	2,06
Outubro	4,89	8,63	6,35	3,69	5,51	6,1	4,03	2,57
Novembro	6,25	8,54	5,61	4,18	5,34	6,14	3,73	2,53
Dezembro	4,75	6,6	5,53	4,23	5,04	5,72	3,67	2,38

Na Tabela (20) podemos observar as velocidades médias mensais do período 2002-2007, na estação 2, na altura de 10m.

Notamos que os ventos de direção nordeste (NE) são os que apresentam as maiores velocidades médias na maior parte do ano, sendo menor apenas nos meses de maio, jun e jul, cujos ventos de maior velocidade média tem direção sudoeste (SO).

As maiores médias ocorreram nos meses de outubro e novembro, com valores 8,63 m/s e 8,54 m/s, respectivamente, para os ventos de direção nordeste (NE).

A velocidade média anual do período 2002-2007 considerando a direção nordeste (NE) foi de 6,83 m/s.

Notamos também que os ventos de direção noroeste são os de menor intensidade em todos os meses do ano do período analisado, e também com a menor distribuição de freqüência conforme Tabela (19).

5. CONCLUSÕES

Durante os estudos realizados na região do litoral norte do Estado do Rio de Janeiro (Baixada Campista) foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A direção nordeste (NE) é a direção predominante do vento para 11 meses do ano, com 38% de frequência média, seguida pela direção sudoeste (SO) com 22% de frequência média no mês de maio;
- Na direção predominante (NE) para a altura de 50m, a velocidade média encontrada foi de 9,45 m/s, um valor acima da média das regiões onde foram realizados estudos no Brasil. Também a densidade de potência média disponível para a direção (NE) foi de 794 w/m². Na segunda direção com maior frequência (sudoeste), tiveram os seguintes valores: Velocidade média de 8,07 m/s e densidade de potência média do vento disponível: 542 w/m²;
- A velocidade média do vento encontrada para a série histórica dos dados analisados no período 2002-2007 (7,73 m/s a 50 m e 5,73 m/s a 10 m na estação 2), se mostrou adequada para a implantação de empreendimentos de geração eólico-elétrica de grande e pequeno porte;
- A densidade de potência do vento (DPV) média para o período 2002-2007 na estação 2 altura de 50m foi de 513 w/m² e na altura de 10m foi de 207 w/m²;
- Não ficou evidenciada ao longo de todo o período analisado a ocorrência de rajadas, onde o maior valor de velocidade encontrado na altura de 10 metros foi de 20,58 m/s;
- As maiores velocidades médias do vento encontradas na altura de 10m foram nos meses de outubro e novembro, para a direção NE, com valores de 8,63 m/s e 8,54 m/s respectivamente;

- A velocidade média do vento encontrada na estação 2, na altura de 50m, no trimestre OND do período 2002-2007 ficou em 8,74 m/s com uma densidade de potência do vento (DPV) média de 679 w/m²;
- O fator de forma K médio de Weibull encontrado variou na faixa de 2,01 a 2,39, próximo a média do litoral do Brasil (Atlas do Potencial Eólico do Brasil CRESESB – CEPEL);
- O fator de forma K de Weibull mostrou ventos mais regulares no trimestre OND, e menos regulares no trimestre MJJ;
- A velocidade média encontrada na região da estação 1 e também em virtude de sua localização próxima ao perímetro urbano da cidade não credencia esta região para empreendimentos eólico-elétricos;
- Os ventos na região da estação 2 no período analisado 2002-2007 apresentaram forte predominância na direção do quadrante nordeste (NE), com 38% de frequência;
- Os dados da re-análise do CDC/NOAA/NCEP confirmaram os resultados obtidos com os dados das observações efetuadas nas estações locais, pela semelhança apresentada nos Gráficos (9) e (10), e entre os Gráficos (12) e (13);
- Por estas razões a região do litoral norte do Estado do Rio de Janeiro (Baixada Campista) pode ser considerada promissora para sediar empreendimentos eólico-elétricos de pequeno e grande porte.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

BIG - Banco de Informação de Geração

Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/15.htm>

Acesso em: set de 2008

CAVALCANTI, E. P., GOMES, F. M., BEZERRA, W. A.. Fluxo de vapor de água atmosférica na obtenção do resíduo et-p em três macrorregiões Brasileiras. **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental.**, 2008 Out; 12(5). ISSN 1415-4366.

CENTRO NACIONAL DE REFERENCIA EM PEQUENAS CENTRAIS
HIDROELÉTRICAS.

Disponível em: http://www.cerpch.unifei.edu.br/fontes_renovaveis/eolica.htm

Acesso em: maio de 2007.

CHAVES, A. ; LYRA, A. ; CHOU, S. C. ; PEREIRA, E. B. . Estimativa preliminar do potencial eólico sobre o Estado de Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2004, Fortaleza. Anais... **Sociedade Brasileira de Meteorologia**, 2004 .

CHOU, S. C. ; PAIVA NETO, A. C. ; CHAGAS, D. J. ; LYRA, A. ; PEREIRA, E. B. . Mapeamento eólico para o Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis, 2006.

CORREA, E. B.; CATALDI, M.; PIMENTEL, L. C. G.. Análise comparativa das simulações do modelo de mesoescala MM5 e dados Meteorológicos observados para a região do Galeão/RJ. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. ISSN 0101-9759 - Vol. 29 - 2 / 2006 p. 66-86

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA.

Tutorial sobre Energia Eólica.

Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>

Acesso em: maio de 2007.

DUTRA, R. M. Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao marco regulatório do setor elétrico Brasileiro. 2001. 309 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

DALMAZ, A.; PASSOS, J. C.; CARUSO, G. L.; OLIVEIRA, J. L. G.. Previsão de ventos para geração de eletricidade no Estado de Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ENERGIAS RENOVÁVEIS
Estimativa do Potencial Eólico Brasileiro.

Disponível em: <http://www.ider.org.br/oktiva.net/1365/nota/17360/>
Acesso em: maio de 2007.

KALNAY et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996.

KUHNEN, G.; COLLE S.; PASSOS, J. S.. Metodologia de avaliação do potencial de geração eólica para o Estado de Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

LEITE, M. L ; VIRGENS FILHO, J. S. . Avaliação da distribuição beta como modelo probabilístico para análise de dados de vento para Ponta Grossa - PR. UEPG. Ciências Exatas e da Terra, **Ciências Agrárias e Engenharias**, v. 13, p. 51-57, 2007.

MIGUEL, A. R. F. Análise do potencial eólico para geração de energia elétrica usando dados em microescala de estações climatológicas no Estado de São Paulo. 2004. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP.

MUNHOZ, F. C.; GARCIA. A.. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava – SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.1, p. 30-34, 2008

OLIVEIRA, C. E. L.; OPAZO, M. A. U. ; FRÜHLING, I.. Análise climatológica do potencial eólico na região de Cascavel - PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 425-433, 2003.

ROZANTE, J. R. O Impacto do aninhamento no modelo ETA nas previsões de tempo. – São José dos Campos: INPE, 2001. 130 p. – (INPE-11432-TDI/953).

SEBASTIAN Y. C. Catunda; et al.. Desenvolvimento de um sistema de medição para determinação do potencial eólico para geração de energia elétrica. II CITENEL - CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DE ENERGIA ELÉTRICA. Anais.

VAREJÃO-SILVA, Mario Adelmo. **Meteorologia e Climatologia** – Brasília: INMET, Ed. Pax, 2001.